

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

**Caractérisation des propriétés de fondations de chaussées réhabilitées
avec des matériaux recyclés stabilisés**

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées
Spécialité: génie civil

Jocelyn BONIN

Sherbrooke (Québec), Canada

Janvier 1997

Sommaire

Les techniques de réhabilitation des chaussées par pulvo-stabilisation sont de plus en plus utilisées dans le monde, et au Québec notamment. Ces techniques recyclent les matériaux en place pour redonner à la chaussée le confort et l'apparence d'une route neuve. Les matériaux recyclés stabilisés issus de ces opérations de réfection sont plutôt mal connus. En effet, leur caractérisation et leur contrôle sont encore relativement difficiles, car très peu d'essais ont été véritablement conçus à cette fin.

Les matériaux recyclés stabilisés possèdent des caractéristiques très variables selon le type de liant utilisé dans l'étape de stabilisation. De façon générale, les facteurs qui influencent la qualité et la durabilité de ces divers types de matériaux sont identifiés. Cependant, l'étude de ces facteurs d'influence est encore très peu avancée. De plus, la venue sur le marché de liant mixte bitume+ciment ajoute au bagage de connaissances nécessaires à leur compréhension globale.

Ce mémoire s'inscrit dans la démarche qui veut, à la fois, augmenter les méthodes de contrôle et de caractérisation des matériaux recyclés stabilisés et accroître le niveau de connaissance générale à l'égard de cette classe de matériaux. Deux projets d'encadrement, un avec la ville de Drummondville et un avec la ville de Montréal, ont permis la réalisation de plusieurs études en laboratoire et sur le terrain portant sur la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés. En conséquence, plusieurs types de matériaux recyclés stabilisés ont pu être étudiés (stabilisation à l'émulsion de bitume, mousse de bitume, ajout de chaux, ajout de ciment, Stabicol, etc.). Ces études permettaient à la fois d'augmenter nos connaissances à l'égard des matériaux testés et de vérifier l'applicabilité de certains essais avec cette classe de matériaux.

Remerciements

J'aimerais, en premier lieu, remercier M. Claude Lupien, professeur responsable des deux mandats qui ont encadré cette maîtrise, pour avoir cru en moi, pour toutes les énergies qu'il a lui-même investies dans ce projet, pour ses nombreux et excellents conseils, sa grande disponibilité et ses grandes qualités humaines qui ont permis la réalisation efficace de ce projet dans un climat de travail exemplaire.

Je voudrais aussi remercier l'équipe du laboratoire de Sintra division de Sherbrooke: M. Yves St-Louis, Michel, Laurent et les autres, pour leurs aides indispensables et les nombreuses discussions d'ordre opérationnel et scientifique aussi constructives que plaisantes.

Un remerciement spécial au Laboratoire de la ville de Montréal, et spécialement à l'équipe responsable de la réalisation des planches d'essais: M. Richard Morin, M. Pierre-Paul Légaré, les techniciens et cols-bleus qui ont contribué de loin ou de près à ce projet (merci Stéphane pour les longues heures passées en ma compagnie et pour ta grande disponibilité).

Finalement, je ne pourrais passer sous silence la contribution et l'encouragement inconditionnel de ma conjointe, ma famille et plusieurs ami(e)s. À vous tous, un grand merci.

Table des matières

Section 1

Chapitre 1. Introduction	2
Chapitre 2. Problématique et état des connaissances	5
2.0 Introduction.....	5
2.1 Définition	6
2.2 Problématique et connaissances générales relatives aux matériaux recyclés stabilisés	6
2.3 État des connaissances	9
2.3.1 Domaine d'application et types de valeurs présentées	9
2.3.2 Stabilité Marshall.....	9
2.3.3 Résistance en compression.....	11
2.3.4 Résistance en tension.....	12
2.3.5 Sensibilité au gel-dégel	13
2.3.6 Les modules élastiques.....	15
2.3.7 L'influence de la température	21
2.3.8 Résistance à l'orniérage.....	25
2.4 Sur le terrain.....	26
2.4.1 Essais et contrôle en chantier	26
2.4.2 Le carottage	28
Chapitre 3. Encadrement du projet de recherche	29
3.0 Les mandats ou les projets d'encadrement.....	29
3.0.1 Introduction.....	29
3.0.2 Le projet avec la ville de Drummondville	29
3.0.3 Le projet avec la ville de Montréal	32

Section 2

Chapitre 4. Normes, procédures et équipements	34
4.0 Introduction.....	34
4.1 Contrôle et formulation des matériaux	34
4.1.1 Généralités	34
4.2 Caractérisation physique des matériaux étudiés	35
4.2.1 Densité brute sèche et absorption.....	35
Normes.....	35
Déroagation	35

4.3 Essais de caractérisation mécanique	35
4.3.1 Essai de stabilité Marshall	35
Normes.....	35
Échantillons	36
4.3.2 Étude de curage avec l'essai Marshall.....	36
Normes.....	36
Échantillons	36
Curage.....	36
Procédure spéciale d'essai pour certaines briquettes stabilisées au Stabicol	37
4.3.3 Essai Brésilien	38
Norme	38
Échantillons	38
Équipement	38
4.3.4 Essai de compression simple	38
Norme	38
Dérogations	38
Échantillons	38
Équipement	38
4.3.5 Essai CBR	39
Normes.....	39
Dérogation	39
Échantillons	39
Teneur en eau prémix et teneur en eau à la compaction	40
Curage des échantillons.....	40
Équipement	41
4.3.6 Étude de gel-dégel.....	41
Normes.....	41
Équipement	41
Fabrication et type d'échantillons utilisés	42
Curage préalable et conditionnement des briquettes.....	42
4.4 Investigations diverses.....	43
4.4.1 Étude d'extraction de bitume.....	43
Normes.....	43
Granulat utilisé	43
Fabrication et curage des échantillons	44
4.4.2 Étude de perméabilité	45
Matériel utilisé.....	45
Fabrication des échantillons.....	46
Préparation	47
Montage	47
Procédure d'essai de perméabilité	48
Généralités.....	48
Déchargement.....	49
Quelques rappels concernant l'utilisation de la contre-pression	49
4.4.3 Étude sur la teneur en eau après curage	50
Normes.....	50

4.4.4 Étude sur l'utilisation de l'essai de densité brute.....	51
Norme.....	51
Détermination de la densité par un essai d'immersion de 10 secondes.....	51
Détermination de la densité par dimensionnement des échantillons.....	51
Détermination de la densité par immersion des échantillons paraffinés.....	52
Détermination de la densité par immersion théorique.....	53

Chapitre 5. Caractérisation des matériaux utilisés pour l'étude: provenance et propriétés physiques	56
5.0 Introduction.....	56
5.1 Matériau pulvérisé et formulation.....	57
5.1.1 Le matériau issu de l'étape de pulvérisation.....	57
5.1.2 Formulation.....	59
5.2 Contrôle en chantier.....	60
5.2.1 Étape de la pulvérisation.....	60
5.2.2 Étape de la stabilisation.....	62
5.3 Reconstitution et fabrication des matériaux étudiés.....	62
5.3.1 Prélèvement et reconstitution du matériau pulvérisé.....	63
5.3.2 Formulation à l'Université de Sherbrooke.....	64
5.3.3 Choix des teneurs en liant et en eau.....	65
5.4 Propriétés physiques des matériaux étudiés.....	65
5.4.1 Masse volumique sèche en fonction de la procédure de compaction.....	66
5.4.2 Absorption d'eau pendant la saturation.....	68
5.5 Les émulsions: CSS-1 et Colfor.....	69
 Chapitre 6. Essais de caractérisation mécanique	 71
6.0 Introduction.....	71
6.1 Essai Marshall: cure normalisée.....	72
6.1.1 Objet et contexte d'étude.....	72
6.1.2 Présentation et analyse des résultats.....	72
6.1.3 Analyse statistique des résultats.....	76
6.2 Étude de stabilité Marshall en fonction du temps de curage.....	78
6.2.1 Objet et contexte d'étude.....	78
6.2.2 Présentation et analyse des résultats.....	80
6.2.3 Augmentation de stabilité Marshall en fonction du temps.....	89
6.2.4 Analyse statistique des résultats.....	93
6.3 Essai Brésilien.....	98
6.3.1 Objet et contexte d'étude.....	98
6.3.2 Présentation et analyse des résultats.....	99
6.3.3 Discussion.....	102
6.3.4 Analyse statistique des résultats.....	103

6.4 Essai de compression simple	105
6.4.1 Objet de l'étude.....	105
6.4.2 Présentation et analyse des résultats.....	105
6.4.3 Discussion et recommandations	108
6.4.4 Analyse statistique des résultats	110
6.5 Essai CBR (California Bearing Ratio).....	112
6.5.1 Contexte général d'étude.....	112
6.5.2 Essais sur le matériau pulvérisé (sans liant d'ajout)	113
Essai Proctor	113
Essais CBR.....	114
6.5.3 Étude de l'indice CBR en fonction de la densité pour les matériaux recyclés stabilisés.....	115
Objet et contexte d'étude.....	115
Présentation et analyse des résultats	116
6.5.4 Étude de curage.....	119
Objet et contexte d'étude.....	119
Présentation et analyse des résultats	120
Analyse statistique des résultats	126
Discussion sur l'applicabilité de l'essai CBR avec les matériaux recyclés stabilisés	128
6.6 Étude de gel-dégel.....	129
6.6.1 Objet et contexte d'étude	129
6.6.2 Présentation et analyse des résultats.....	129
6.6.3 Discussion	132
6.7 Conclusion sur les essais de caractérisation mécanique.....	133
 Chapitre 7. Investigations diverses	 137
7.0 Introduction.....	137
7.1 Étude d'extraction de bitume avec liant mixte.....	138
7.1.1 Objectif général de l'étude.....	138
7.1.2 Hypothèses et objectifs spécifiques de l'étude.....	138
7.1.3 Présentation et analyse des résultats	139
7.1.4 Recommandations	141

7.2 Étude de perméabilité	142
7.2.1 Objet et contexte d'étude	142
7.2.2 Présentation et analyse des résultats.....	143
Essai #1 sur matériau stabilisé au CSS-1	143
Essai #2 sur matériau stabilisé au CSS-1	143
Essai #1 sur matériau stabilisé au Stabicol	144
Essai #2 sur matériau stabilisé au Stabicol.....	144
Valeurs types choisies.....	145
7.3 Étude sur la teneur en eau après curage	149
7.3.1 Objet et contexte d'étude	149
7.3.2 Présentation et analyse des résultats.....	150
7.4 Étude et critique sur l'utilisation de densité brute.....	152
7.4.1 Objet de la critique	152
7.4.2 Réalisations	155
7.4.3 Présentation et analyse des résultats.....	155
7.4.4 Conclusion et recommandations.....	158
7.5 Écart entre la presse Baldwin et Marshall: étude	
statistique.....	159
7.5.1 Objet et contexte d'étude	159
7.5.2 Problématique.....	160
7.5.3 Procédures et résultats.....	160

Section 3

Chapitre 8. Caractérisation de matériaux recyclés stabilisés

par des essais de terrain	167
8.0 Introduction.....	167
8.1 Les essais de terrain utilisés.....	168
8.1.1 La poutre Benkelman.....	168
8.1.2 L'essai Dynaflect et FWD (Falling Weight Deflectometer).....	169
8.1.3 Essai de plaque	172
Équipements	172
Procédure d'essai utilisée.....	172
Calcul et discussion sur le module "k"	173
Calcul et discussion sur le module "E".....	173
8.1.5 L'essai au pénétromètre dynamique.....	174
8.2 Résultats obtenus sur les planches d'essais.....	175
8.2.1 Description des planches d'essais.....	175
8.2.2 Présentation et analyse des résultats à la poutre Benkelman.....	178
8.2.3 Présentation et analyse des résultats à l'essai Dynaflect.....	183
8.2.4 Présentation et analyse des résultats à l'essai FWD	188

8.2.5 Présentation et analyse des résultats à l'essai de plaque.....	195
Les essais effectués sur la fondation	195
Les essais effectués sur les matériaux recyclés stabilisés: 1 ^{ère} campagne	198
Les essais effectués sur les matériaux recyclés stabilisés: 2 ^{ème} et 3 ^{ème} campagne	200
8.2.6 Discussion	205
8.3 Essais au FWD sur le boulevard Lemire à Drummondville	208
8.3.1 Introduction.....	208
8.3.2 Présentation et analyse des résultats	209
8.4 Discussion.....	212
Chapitre 9. L'essai au pénétromètre dynamique	213
9.0 Introduction.....	213
9.1 Le pénétromètre dynamique.....	214
9.1.1 Historique et généralités	214
9.1.2 Procédure d'essai	216
9.1.3 Objet et contexte d'études	216
9.1.4 Réalisations	217
9.1.5 Constatations préliminaires	218
9.1.6 Rapport d'analyse statistique	219
9.1.7 Présentation et analyse de certains résultats typiques	221
Stabicol versus CSS-1 à Drummondville	226
Émulsion, émulsion+ciment et émulsion+chaux	228
Mousse, mousse+ciment, mousse+chaux.....	229
Mousse versus émulsion.....	230
9.1.8 Module de portance et résultats au pénétromètre	231
9.1.9 Discussion et recommandations	233
Section 4	
Chapitre 10. Éléments de synthèse et conclusion	236
10.0 Éléments de synthèse.....	236
10.0.1 Introduction.....	236
10.0.2 Synthèse des résultats	237
10.1 Généralités et conclusion	244
Annexe 1. Annexes se rapportant au chapitre 5	247
Annexe 2. Annexes se rapportant au chapitre 6	256
Annexe 3. Annexes se rapportant au chapitre 7	274
Annexe 4. Annexes se rapportant au chapitre 8	278
Annexe 5. Annexes se rapportant au chapitre 9	296
Bibliographie	301

Liste des graphiques et figures

Section 1

Figure 2.1 Application de la force et fissure de rupture à l'essai Brésilien.....	12
-----------------------------------------------------------------------------------	----

Section 2

Figure 4.1 Schéma simplifié du moule du perméamètre.....	46
Graphique 5.1 Courbes granulométriques du matériau pulvérisé et du combiné en fonction du fuseau du MTQ	58
Graphique 6.1 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction.....	74
Graphique 6.2 Stabilité Marshall après saturation en fonction du pourcentage de compaction	74
Graphique 6.3 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 2 jours.....	82
Graphique 6.4 Stabilité Marshall après saturation en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 2 jours	82
Graphique 6.5 Stabilité Marshall en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 4 jours, Stabicol	83
Graphique 6.6 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 6 jours.....	85
Graphique 6.7 Stabilité Marshall après saturation en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 6 jours	85
Graphique 6.8 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 27 jours.....	87
Graphique 6.9 Stabilité Marshall après saturation en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 27 jours	87
Graphique 6.10 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction et du temps de cure	88
Graphique 6.11a Stabilité Marshall témoin en fonction du temps de cure.....	90
Graphique 6.11b Stabilité Marshall après saturation en fonction du temps de cure.....	90
Graphique 6.12 Taux d'augmentation de stabilité Marshall en fonction du temps de cure.....	91
Graphique 6.13 Résistance en tension témoin en fonction du pourcentage de compaction.....	100

Graphique 6.14 Résistance tension après saturation en fonction du pourcentage de compaction.....	100
Graphique 6.15 Résistance en compression simple témoin en fonction du pourcentage de compaction.....	107
Graphique 6.16 Résistance en compression simple après saturation en .. fonction du pourcentage de compaction.....	107
Graphique 6.17 Résultats de l'essai Proctor sur le granulat issu la pulvérisation	113
Graphique 6.18 Indice CBR en fonction du pourcentage de compaction le granulat recyclé.....	114
Graphique 6.19 Indice CBR en fonction du pourcentage de compaction, liant CSS-1	118
Graphique 6.20 Indice CBR en fonction du pourcentage de compaction, liant Stabicol.....	118
Graphique 6.21 CBR moyen en fonction du temps de curage, CSS-1.....	124
Graphique 6.22 CBR moyen en fonction du temps de curage, Stabicol.....	124
Graphique 6.23 Indice CBR en fonction de la teneur en eau en fonction 2,5 ^{er} cm, CSS-1	125
Graphique 6.24 Indice CBR en fonction de la teneur en eau en fonction 2,5 ^{er} cm, Stabicol	125
Graphique 7.1 Perméabilité en fonction de la contre-pression, liant CSS-1	148
Graphique 7.2 Perméabilité en fonction de la contre-pression, liant Stabicol	148
Graphique 7.3 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, presse Baldwin, cure normale + 2 jours	162
Graphique 7.4 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, presse Marshall, cure normale + 4 jours.....	162
Graphique 7.5 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, presse Baldwin, cure normale + 6 jours	163

Section 3

Figure 8.1 Section et plan de localisation des planches d'essais pour 1995 et 1996.....	175
Figure 9.1 Pénétromètre	215
Graphique 9.1 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, Stabicol Drummondville.....	222

Graphique 9.2 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, CSS-1 Drummondville	222
Graphique 9.3 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995, émulsion	223
Graphique 9.4 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, rue Cochrane, émulsion	224
Graphique 9.5 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995, émulsion+ciment	224
Graphique 9.6 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995 émulsion+chaux	225
Graphique 9.7 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995 et 1996, mousse+ciment	226
Graphique 9.8 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995 et 1996, mousse	227
Graphique 9.9 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995 et 1996, mousse+chaux	228

Section 4

Graphique 10.1 Comparaison des performances mécaniques du liant Stabicol et de l'émulsion CSS-1	238
Graphique 10.2 Augmentation de l'indice CBR en fonction du temps, CSS-1 et Stabicol, condition immergée et non immergée	239
Graphique 10.3 Stabilité Marshall en fonction du temps de cure, liant CSS-1 et Stabicol, condition témoin et après saturation	240
Graphique 10.4 Indice CBR et résultat au pénétromètre en fonction du temps de cure, liant CSS-1	241
Graphique 10.5 Comparaison du pénétromètre, FWD et essai de plaque sur les planches d'essais	242

Annexe 1

Graphique A1.1 Teneur en eau à la compaction - Formulation Université de Sherbrooke (valeurs moyennes)	248
Graphique A1.2 Formulation Université de Sherbrooke, Graphiques nécessaires à la détermination du % de bitume d'ajout optimal	250

Liste des tableaux

Section 1

Tableau 2.1 Variation de modules résilients et dynamiques sur grave-émulsion en fonction de la température	22
Tableau 2.2 Variation de modules dynamiques sur grave-mousse en fonction de la température	24
Tableau 2.3 Variation de modules élastiques sur grave-Stabicol en fonction de la température	25

Section 2

Tableau 5.1 Granulométrie et correction sur le granulat pulvérisé	58
Tableau 5.2 Caractéristiques du matériau stabilisé aux teneurs en eau et en liant d'ajout optimales	60
Tableau 5.3 Granulométrie et teneurs en bitume du matériau pulvérisé	61
Tableau 5.4 Reconstitution granulométrique	64
Tableau 5.5 Masses volumiques sèches obtenues en fonction de la procédure de compaction et du liant utilisé	67
Tableau 5.6 Absorption d'eau à la saturation en fonction de la procédure de compaction et du liant utilisé	69
Tableau 6.1 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall en fonction du liant et du pourcentage de compaction pour une cure normalisée.....	73
Tableau 6.2 Analyse statistique des résultats Marshall cure normalisée	77
Tableau 6.3 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall en fonction du liant et du pourcentage de compaction pour une cure normalisée + 2 jours	81
Tableau 6.4 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall en fonction du pourcentage de compaction, liant Stabicol pour une cure normalisée + 4 jours	83
Tableau 6.5 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall en fonction du liant et du pourcentage de compaction pour une cure normalisée + 6 jours.....	84

Tableau 6.6 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall en fonction du liant et du pourcentage de compaction pour une cure normalisée + 27 jours.....	86
Tableau 6.7 Augmentation de stabilité Marshall en fonction du temps de cure et du liant pour 95% et 100% de compaction	89
Tableau 6.8 Analyse statistique des résultats Marshall cure normalisée + 2 jours	94
Tableau 6.9 Analyse statistique des résultats Marshall cure normalisée + 4 jours	95
Tableau 6.10 Analyse statistique des résultats Marshall cure normalisée + 6 jours (CSS-1 1 ^{er} lot).....	95
Tableau 6.11 Analyse statistique des résultats Marshall cure normalisée + 6 jours	96
Tableau 6.12 Analyse statistique des résultats Marshall cure normalisée + 27 jours	97
Tableau 6.13 Résistance en tension obtenue à l'essai Brésilien en fonction du liant et du pourcentage de compaction	99
Tableau 6.14 Qualité de rupture obtenue à l'essai Brésilien selon le liant utilisé	102
Tableau 6.15 Analyse statistique des résultats de l'essai Brésilien.....	104
Tableau 6.16 Résistance en compression simple en fonction du pourcentage de compaction et du liant.....	106
Tableau 6.17 Analyse statistique des résultats à l'essai de compression simple.....	111
Tableau 6.18 Indices CBR en fonction du pourcentage de compaction, granulat recyclé.....	114
Tableau 6.19 Indice CBR sans immersion en fonction du liant et du pourcentage de compaction	116
Tableau 6.20 Indice CBR avec immersion en fonction du liant et du pourcentage de compaction	117
Tableau 6.21 Indice CBR moyen sans immersion en fonction du curage et du liant.....	121
Tableau 6.22 Indice CBR moyen avec immersion en fonction du curage et du liant.....	121
Tableau 6.23 Analyse statistique des résultats à l'essai CBR, étude de curage.....	127
Tableau 6.24 Résultats moyens de stabilité Marshall en fonction du liant et du nombre de cycles de gel-dégel.....	131
Tableau 7.1 Résultats des essais d'extraction de bitume	140

Tableau 7.2 Résultats des essais de perméabilité avec matériau recyclé stabilisé - Liant CSS-1	146
Tableau 7.3 Résultats des essais de perméabilité avec matériau recyclé stabilisé - Liant Stabicol	147
Tableau 7.4 Résultats moyens obtenus pour l'étude de la teneur en eau après curage	151
Tableau 7.5 Résultats pour l'étude du calcul de la densité	157
Tableau 7.6 Différence entre l'essai BNQ 2300-040 et la densité par "immersion théorique"	158
Tableau 7.7 Stabilités Marshall témoins corrigées en fonction d'une compaction de 100%.....	164
Tableau 7.8 Valeurs moyennes et intervalles de confiance pour chaque lots de briquettes et sur "l'erreur" de la presse Baldwin.....	165

Section 3

Tableau 8.1 Résultats des essais à la poutre Benkelman	180
Tableau 8.2 Résultats l'essai Dynaflect	185
Tableau 8.3 Résultats à l'essai FWD	191
Tableau 8.4 Résultats au FWD corrigés pour une température de 15°C.....	192
Tableau 8.4(a) Déflexion représentative en fonction de la déflexion maximale relevée au FWD.....	194
Tableau 8.5 Valeur du module "k" et "E" pour la pierre de fondation 0-40 mm	196
Tableau 8.6 Résultats moyens obtenus à l'essai de plaque à la campagne d'octobre 1995	199
Tableau 8.7 Résultats moyens comparatifs obtenus à l'essai de plaque pour les 1 ^{ère} et 2 ^{ème} campagnes	201
Tableau 8.8 Modules élastiques statiques corrigés pour 15°C, 1 ^{ère} et 2 ^{ème} campagne	203
Tableau 8.9 Valeurs comparatives du module "E" et "k" 1 ^{ère} et 3 ^{ème} campagne	204
Tableau 8.10 Résultats moyens obtenus au FWD Boulevard Lemire, Stabilisation au CSS-1 et Stabicol	210
Tableau 9.1 Résistance à la pénétration et module d'élasticité pour différents matériaux recyclés stabilisés	232

Annexe 1

Tableau A1.1 Formulation Université de Sherbrooke, Détermination du pourcentage d'ajout de bitume optimal	249
Tableau A1.2 Résultats de densité brute sèche en fonction de la procédure de compaction, liant CSS-1	251
Tableau A1.3 Résultats de densité brute sèche en fonction de la procédure de compaction, liant Stabicol	252
Tableau A1.4 Résultats de densité brute sèche en fonction de la procédure de compaction, liant CSS-1, étude de curage, essai Marshall	253
Tableau A1.5 Résultats de densité brute sèche en fonction de la procédure de compaction, liant Stabicol, étude de curage, essai Marshall	254
Tableau A1.6 Absorption d'eau à la saturation en fonction de la procédure de compaction, du liant, de l'essai et du temps de cure	255

Annexe 2

Tableau A2.1 Résultats essai Marshall - cure normalisée - liant CSS-1 et Stabicol	257
Tableau A2.2 Résultats essai Marshall - cure normalisée + 2 jours - liant CSS-1 et Stabicol	258
Tableau A2.3 Résultats essai Marshall - cure normalisée + 4 jours pour liant Stabicol et cure normalisée + 6 jours pour liant CSS-1 (lot #1)	259
Tableau A2.4 Résultats essai Marshall - cure normalisée + 6 jours - liant CSS-1 (lot #2) et Stabicol	260
Tableau A2.5 Résultats essai Marshall - cure normalisée + 27 jours - liant CSS-1 et Stabicol	261
Tableau A2.6 Résultats essai Brésilien - cure normalisée - liant CSS-1 et Stabicol	262
Tableau A2.7 Qualité de fissures, essais Brésiliens, liant CSS-1	263
Tableau A2.8 Qualité de fissures, essais Brésiliens, liant Stabicol	264
Tableau A2.9 Résultats essai de compression simple - cure normalisée - liant CSS-1 et Stabicol	265
Tableau A2.10 Résultats CBR, variation de la densité, granulat	266
Tableau A2.11 Résultats CBR sans immersion, variation de la densité, CSS-1	267

Tableau A2.12 Résultats CBR sans immersion, variation de la densité, Stabicol.....	267
Tableau A2.13 Résultats CBR avec immersion, variation de la densité, CSS-1	268
Tableau A2.14 Résultats CBR avec immersion, variation de la densité, Stabicol.....	268
Tableau A2.15 Résultats sans immersion, étude de curage, CSS-1.....	269
Tableau A2.16 Résultats sans immersion, étude de curage, Stabicol.....	270
Tableau A2.17 Résultats avec immersion, étude de curage, CSS-1	271
Tableau A2.18 Résultats avec immersion, étude de curage, Stabicol.....	272
Tableau A2.19 Résultats étude de gel-dégel CSS-1 et Stabicol.....	273

Annexe 3

Tableau A3.1 Résultats étude de teneur en eau après curage.....	275
Tableau A3.2 Résultats complets étude sur l'utilisation de l'essai de densité brute, Liant CSS-1	276
Tableau A3.3 Résultats complets étude sur l'utilisation de l'essai de densité brute, Liant Stabicol.....	277

Annexe 4

Tableau A4.1 Résultats à l'essai Dynaflect, planches d'essais CTED.....	279
Tableau A4.2 Résultats obtenus à l'essai FWD	282
Tableau A4.3 Valeur de k et E pour chaque matériau testé, Essai de plaque campagne 1995	285
Tableau A4.4 Module d'élasticité "E" statique, essais de plaque à 1 palier de chargement, Août 1996, 2 ^{ème} campagne	289
Tableau A4.5 Valeur de k et E, 3 ^{ème} campagne d'essais, Planches reconstruites en août 1996 et testées en septembre 1996	291
Tableau A4.6 Résultats au FWD, boulevard Lemire à Drummondville Stabilisation au CSS-1, Direction Sud et Nord Relevés 1995 et 1996	293
Tableau A4.7 Résultats au FWD 1995 et 1996, boulevard Lemire Stabilisation au Stabicol, Direction Nord	294
Tableau A4.8 Résultats au FWD 1995 et 1996, boulevard Lemire Stabilisation au Stabicol, Direction Sud	295

Annexe 5

Tableau A5.1 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, Boulevard Lemire à Drummondville, été 1995	297
Tableau A5.2 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, Planches d'essais, CTED Montréal automne 1995 et 1996	298

Section 1

Introduction du sujet

Problématique et revue de littérature

Projets d'encadrement

Cette première section du mémoire introduit d'abord le sujet au lecteur et présente la structure du mémoire. Elle brosse ensuite un tableau relatif à la problématique et à l'état des connaissances reliées aux matériaux recyclés stabilisés. Finalement, elle décrit les deux principaux projets qui ont encadré et permis la réalisation de ce mémoire. Cette section comprend trois chapitres:

Chapitre 1. Introduction

Chapitre 2. Problématique et état des connaissances

Chapitre 3. Encadrement du projet de recherche

Chapitre 1. Introduction

Le vieillissement et la dégradation avancée de plusieurs réseaux routiers dans le monde, ainsi qu'un souci grandissant à l'égard de la préservation de nos ressources naturelles et l'augmentation importante du coût des produits pétroliers durant les années 1970, ont favorisé l'émergence de nouvelles techniques de réhabilitation des chaussées basées sur la réutilisation des matériaux en place. Parmi les méthodes de recyclage des matériaux secs les plus fréquemment employées dans le domaine routier, nommons la réutilisation des bétons concassés dans les granulats, l'ajout à faible et à fort taux de vieux bétons bitumineux dans la fabrication des nouveaux enrobés à chaud et les techniques apparentées au thermorecyclage. Finalement, une technique se démarque par son potentiel et sa grande popularité, notamment au Québec, c'est une méthode de réfection par stabilisation des matériaux recyclés en place ou en centrale (souvent nommée pulvo-stabilisation). Cette méthode redonne à l'usager de la route le confort d'une route neuve tout en réutilisant les matériaux déjà en place. Elle permet également d'accroître de façon sensible la portance de la chaussée, pouvant ainsi résoudre certains problèmes reliés aux chaussées sous-dimensionnées.

L'avancement et l'optimisation de cette méthode sont conditionnels à la bonne connaissance des matériaux recyclés stabilisés. Malheureusement, ce type de matériau est relativement mal connu. En effet, les matériaux stabilisés ne se comportent ni comme les granulats ni comme les bétons usuellement employés dans le domaine routier. L'utilisation de matériaux recyclés dans le processus de stabilisation vient ajouter à la complexité et à l'étendue des connaissances nécessaires à la maîtrise de cette méthode. De plus, il n'est pas suffisant de bien connaître un matériau, il faut également être en mesure de bien contrôler la qualité de fabrication et de mise en place de celui-ci. En effet, s'il est primordial de concevoir adéquatement les infrastructures routières, il est impératif que les matériaux et la mise en place de ceux-ci répondent aux critères de conception utilisés. Finalement, la diversité des stabilisants utilisés et la venue sur le marché de nouveaux types de liants viennent augmenter le fardeau des connaissances essentielles au contrôle et à l'optimisation de cette classe de matériaux.

Dans ce contexte, l'objet général de ce projet de recherche est simplement d'augmenter les connaissances sur les propriétés des matériaux recyclés stabilisés. Pour ce faire, plusieurs

méthodes de caractérisation en laboratoire et sur le terrain seront étudiées et ce pour plusieurs types de stabilisants.

Ce mémoire est subdivisé en quatre sections bien distinctes. En effet, la recherche effectuée a été encadrée par deux projets différents. Par conséquent, il nous semblait impossible de présenter la démarche complète de façon linéaire, c.-à-d. sans présenter de séparations plus rigoureuses que celles exprimées par les limites d'un simple chapitre.

La première section introduit le sujet au lecteur. Elle discute ensuite de la problématique entourant la caractérisation et le contrôle des matériaux recyclés stabilisés. Elle présente également une revue de littérature permettant au lecteur de juger de l'état des connaissances actuelles dans ce domaine. Finalement, elle décrit les projets d'encadrement qui ont permis la réalisation de cette maîtrise, afin que le lecteur soit en mesure de connaître le contexte et les motivations d'étude entourant chaque section et chapitre de ce mémoire.

La deuxième section du mémoire est consacrée exclusivement aux études comparatives en laboratoire menées sur un granulat recyclé stabilisé avec une émulsion de bitume (CSS-1) et une émulsion de bitume+ciment (Stabicol 90). Cette partie importante du programme de recherche est reliée au projet de réfection du boulevard Lemire à Drummondville réalisée durant l'été 1995 (pour plus d'informations à ce sujet, voir chapitre 3). Cette section traite en premier lieu des normes, procédures et équipements utilisés pour la réalisation des essais effectués en laboratoire. Bon nombre de procédures ont dû être inventées et/ou modifiées pour s'adapter aux conditions des matériaux étudiés. Par conséquent, plusieurs procédures d'essais ou de fabrication des échantillons sont décrites avec précision afin que le lecteur puisse comprendre les analyses présentées par la suite et juger de leur validité. Cette section se penche ensuite sur la caractérisation des matériaux utilisés pour l'étude. Finalement, les résultats des différentes études menées sont présentés et analysés. Leurs présentations se font par l'entremise de deux chapitres, soit un chapitre consacré aux études se rapportant à la caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux et un autre sur des investigations diverses. Les essais relatifs à la caractérisation mécanique réalisés sont l'essai Marshall, Brésilien, compression simple et CBR. Des études faisant varier le degré de compacité des matériaux étudiés et le temps de cure ont été réalisées en utilisant

ces essais. De plus, une étude sur la sensibilité de ces matériaux aux cycles de gel-dégel a été effectuée. Parmi les autres expérimentations (ne portant pas sur les propriétés mécaniques), citons une étude portant sur l'extraction de bitume avec un liant mixte (bitume+ciment), une étude de perméabilité et une investigation sur l'erreur potentiellement engendrée sur la masse volumique sèche par la réalisation de l'essai normalisé (BNQ 2300-040) utilisé actuellement avec les matériaux recyclés stabilisés.

La troisième section du mémoire présente et analyse les résultats obtenus pour les essais effectués sur le terrain. En très grande majorité, ces données proviennent d'essais réalisés dans le cadre du projet avec le Laboratoire de la ville de Montréal, mais quelques unes sont issues d'investigations menées sur le boulevard Lemire à Drummondville (pour plus d'informations sur ces deux projets, voir chapitre 3). Cette section comprend deux chapitres. Le premier présente et analyse les résultats obtenus grâce à la réalisation de plusieurs types d'essais: poutre Benkelman, Dynaflect, Falling Weight Deflectometer (FWD), essai de plaque, etc. sur les planches d'essais construites au CTED de la ville de Montréal. Ce véritable laboratoire de terrain permet non seulement de caractériser plusieurs matériaux recyclés stabilisés, mais aussi de comparer les résultats obtenus à partir de différents types d'essais. Certaines données provenant de deux campagnes de relevés au FWD sur le boulevard Lemire sont également analysées. Finalement, cette section présente un résumé des résultats obtenus sur l'étude du potentiel d'un outil expérimental (le pénétromètre dynamique) visant à caractériser la cure des matériaux recyclés stabilisés en chantier.

La dernière section ne contient qu'un seul chapitre: la conclusion. Ce chapitre soulignera naturellement les plus importants développements présentés tout au long du mémoire, mais s'intéressera également aux recoupements possibles entre les résultats de terrain et de laboratoire obtenus.

Chapitre 2. Problématique et état des connaissances

2.0 Introduction

La caractérisation et le parfait contrôle d'un matériau demandent en général beaucoup de temps et de connaissances. Les matériaux classiques dans le domaine des chaussées tels les sables, les graviers, les pierres concassées, les bétons bitumineux et de ciment sont aujourd'hui assez bien compris et contrôlés. L'ingénieur possède de nos jours des outils aptes à optimiser la construction ou la réfection de chaussées à l'aide de ces matériaux. Bien entendu, ces matériaux évoluent et les méthodes de conception changent, mais le bagage de connaissances important relatif à ces matériaux permet de s'adapter à ces modifications.

La stabilisation des sols est connue et utilisée depuis près d'un siècle. L'utilisation d'émulsion de bitume avec les fondations de chaussée a débuté à grande échelle dans les années 1960 en Europe. Cependant, leur utilisation a toujours été beaucoup plus limitée que celle reliée aux matériaux classiques. Cette constatation est encore plus marquée au Québec (et au Canada en général) où l'utilisation des fondations traitées (grave stabilisée) dans la construction des chaussées n'est pas une pratique coutumière. En conséquence, il y a beaucoup moins d'études effectuées sur les matériaux stabilisés que pour les granulats et les bétons. De plus, les essais de caractérisation des matériaux en laboratoire et en chantier ont toujours été conçus en fonction des propriétés des matériaux classiques. Le matériau stabilisé est donc caractérisé à l'aide d'essais souvent mal adaptés à sa condition. Finalement, l'introduction des matériaux recyclés dans le processus de stabilisation vient augmenter le bagage nécessaire à la compréhension globale de cette classe de matériaux. Pourtant, et malgré ce handicap, les techniques de réfection utilisant les matériaux recyclés stabilisés gagnent rapidement en popularité. Il devient donc important d'augmenter de façon générale l'ensemble des connaissances relatives à la caractérisation et au contrôle de cette classe de matériaux.

2.1 Définition

Un matériau stabilisé se compose habituellement d'un sol ou d'un granulat auquel un liant et autres produits sont ajoutés en vue de lui donner une certaine prise ou cohésion et d'augmenter ainsi sa "résistance". Même si cette définition ressemble également à celle des bétons, il existe d'importantes différences entre ceux-ci et les matériaux stabilisés. En effet, le dosage en liant et le pourcentage d'enrobage des granulats est généralement moindre pour ces derniers que pour les bétons. Ceci confère aux matériaux stabilisés des comportements relativement différents que ceux rencontrés avec les bétons.

Les matériaux stabilisés sont généralement classés suivant leur type de liant, soit les liants hydrauliques (ciment, cendres volantes, laitiers, pouzzolanes, chaux) et les liants hydrocarbonés (bitume, émulsion de bitume, bitume moussé). Il est possible d'ajouter à ces deux classes les matériaux stabilisés mixtes, c.-à-d. avec les deux types de liants à la fois. Ce mémoire se penche principalement sur la stabilisation aux liants hydrocarbonés et mixtes.

Peu importe le liant choisi, le matériau stabilisé nécessite une période de curage au cours de laquelle ses propriétés mécaniques évolueront. Cette cure diffère cependant en temps et en procédé selon le liant utilisé.

2.2 Problématique et connaissances générales relatives aux matériaux recyclés stabilisés

Il est relativement facile d'affirmer que les connaissances actuelles dans le domaine des matériaux recyclés stabilisés sont peu nombreuses, et qu'il est nécessaire, dans un contexte d'optimisation, de les augmenter. Mais plus spécifiquement, où devons-nous chercher? Que devons-nous faire? Quels sont les problèmes, les obstacles les plus urgents à étudier? Les réponses à ces questions ne sont pas évidentes et dépendent en partie de l'utilisation que l'on désire appliquer à ces matériaux. Dans le contexte de ce mémoire, les matériaux recyclés stabilisés sont exclusivement utilisés

comme fondation (supérieure) de chaussée, et le plus souvent à l'intérieur d'une intervention de réfection.

Compte tenu de ce contexte, les questions soulevées concernent les quatre aspects suivants:

- Caractérisation et propriétés mécaniques des matériaux recyclés stabilisés.
- Formulation et fabrication des matériaux recyclés stabilisés.
- Caractérisation et contrôle de la cure des matériaux recyclés stabilisés.
- Avantages et inconvénients des différents types de liants, et leurs interactions avec les granulats recyclés.

L'avenue présentement préconisée dans la caractérisation de ces matériaux est d'employer les essais (de laboratoire et sur le terrain) déjà développés pour les sols et/ou les bétons. Même si cette méthode comporte de nombreux avantages, on se questionne sur la compétence des différents essais utilisés à bien caractériser cette classe de matériaux. Un des objectifs de ce mémoire est justement la recherche de méthodes de caractérisation efficaces avec les matériaux recyclés stabilisés.

En ce qui concerne la formulation (teneurs en eau et liant optimales) des matériaux recyclés stabilisés, il y a présentement au Québec une procédure à l'essai (en vue de devenir une norme). Cependant, son champ d'application est limité à une stabilisation à l'émulsion de bitume. Bien entendu, il est possible d'utiliser cette procédure pour formuler un matériau stabilisé à l'aide d'un liant différent, mais le résultat n'est alors pas nécessairement optimal. La fabrication de ces matériaux peut être effectuée en centrale de concassage-malaxage ou directement sur place à l'aide d'équipements spécialisés. Le contrôle en centrale de la granulométrie, du dosage en eau et en liant, et du malaxage est excellent. Cependant, l'équipement (pourtant relativement sophistiqué) de pulvo-stabilisation en place ne permet pas un aussi bon contrôle de ces paramètres. En effet, on retrouve souvent des particules agglomérées de béton bitumineux de plus de 40 mm après la pulvérisation, alors que la granulométrie visée est un 0-20 mm. De plus, l'épaisseur d'intervention n'est pas contrôlée à 100%, le dosage en liant est quelques fois hétérogène, les obstacles urbains (regards, trottoirs, bordures, etc.) empêchent la pulvérisation et la stabilisation mécanique sur

toute la surface et la qualité du malaxage est variable selon l'équipement utilisé. Malgré tout, les fabricants d'équipements améliorent constamment leurs machines et déjà la situation est bien meilleure que celle qui prévalait il y a à peine quelques années.

La variation des propriétés physiques et mécaniques en fonction du temps (et de d'autres facteurs également) de ces matériaux est connue. La plupart des facteurs d'influence sont aujourd'hui identifiés en fonction du type de liant utilisé. Cependant, il est encore impossible de prévoir de façon analytique, en fonction des facteurs d'influence, la progression des propriétés mécaniques des matériaux stabilisés. Il existe peu de moyens techniques pour suivre en chantier la progression de la cure. Il sera discuté d'une avenue de contrôle de la cure en chantier au chapitre 9 de ce mémoire.

Les forces et faiblesses des différents liants sont relativement bien documentées. Les liants mixtes font toutefois exception, car l'expérience à long terme avec ceux-ci (et particulièrement pour des conditions environnementales comme les nôtres) est encore très faible. On reconnaît également qu'il existe une interaction entre les granulats recyclés et les liants, mais son importance et son influence est encore une simple question d'opinion. Par exemple, quelle est l'importance de la régénération du vieux bitume contenu dans les granulats lors d'une stabilisation à l'émulsion? Lors d'une stabilisation à l'émulsion de bitume, il doit avoir compatibilité (attirance) entre celle-ci et les granulats (recyclés ou non) afin de permettre une bonne coagulation du bitume sur les granulats.

Suite à cette discussion générale, le lecteur est davantage en mesure de juger du niveau d'avancement des connaissances relatives aux matériaux stabilisés. Sans se situer dans la préhistoire, le niveau de connaissances actuel, en comparaison à celui des matériaux dits classiques, pourrait être qualifié de l'enfance de l'art.

2.3 État des connaissances

2.3.1 Domaine d'application et types de valeurs présentées

Cette section de mémoire se penche sur les propriétés typiques des matériaux *recyclés* stabilisés rencontrés dans la littérature. Il est cependant impossible de se restreindre actuellement aux valeurs correspondant au cadre très pointu des matériaux *recyclés* stabilisés. En effet, peu d'études ont été, jusqu'à maintenant, réalisées exclusivement sur ce type de matériaux. Par ailleurs, les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux stabilisés *non recyclés* sont susceptibles de se rapprocher de celles des matériaux *recyclés* stabilisés. En conséquence, les valeurs présentées seront souvent issues d'études portant sur la caractérisation des graves stabilisées, mais non recyclées.

Cette section présentera autant que possible des valeurs caractéristiques pour les matériaux stabilisés à l'émulsion de bitume et aux liants mixtes. Certaines valeurs relatives aux matériaux stabilisés à la mousse de bitume seront également rapportées, car ce type de matériau a été étudié à quelques reprises au cours de nos études.

2.3.2 Stabilité Marshall

L'essai Marshall a été développé pour caractériser et contrôler la qualité des enrobés bitumineux. Cet essai consiste à mesurer la résistance d'une éprouvette placée dans une mâchoire dont les segments tendent à se rapprocher sous l'action d'un vérin. Cet essai est de plus en plus critiqué à cause des petites dimensions de l'éprouvette et du mode de compression utilisé. Malgré tout, l'essai Marshall est présentement l'essai de laboratoire le plus employé au Québec dans le domaine des matériaux bitumineux et stabilisés. La méthode de formulation des mélanges recyclés stabilisés utilisée au Québec (procédure non normalisée mais recommandée par le MTQ) utilise cet essai pour déterminer la composition optimale du mélange [LOISEL, 1994].

Les valeurs typiques de stabilité pour un matériau recyclé stabilisé à l'émulsion sont de l'ordre de 7000 à 17000 N (pour une cure normalisée et dosage en bitume optimal), mais après saturation

celui-ci subit une perte de stabilité Marshall variant en général de 20 à 50%. Il n'est cependant pas rare d'observer dans la littérature des valeurs de stabilité Marshall sortant de ces limites de façon relativement importante. Avant de faire des comparaisons, il faut porter une attention particulière à l'exposition (cure) des échantillons avant l'essai, car ce facteur influence de façon importante la stabilité Marshall. Par exemple, Epps [EPPS et coll., 1990] rapporte une augmentation de stabilité Marshall de plus de 300% pour une cure variant de 2 jours (air libre) à 30 jours (air libre). La stabilité Marshall est aussi influencée par la qualité du granulat et surtout par la compatibilité émulsion-granulat. Finalement, la température d'essai est également un facteur à surveiller, car Loisel [LOISEL, 1994] a démontré que les matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion étaient très sensibles aux variations de température à l'égard de leurs performances mécaniques. Normalement, l'essai de compression Marshall est réalisé sur les matériaux stabilisés à 22°C.

Les valeurs obtenues avec un liant mixte bitume-ciment permettent d'augmenter considérablement la stabilité Marshall. On note par exemple des augmentations de l'ordre de 16 à 37% de stabilité Marshall pour des ajouts de ciment de 1 à 4% de ciment [BONIN, 1993]. Le MTQ a présenté, dans une étude, une formulation comparative entre une stabilisation au CSS-1 et une autre au Stabicol (liant mixte) [BEAUDOIN et coll., 1994]. On note dans ce rapport une augmentation de l'ordre de 20% de la stabilité Marshall (témoin et après saturation) en faveur du liant Stabicol 90 (remplacement d'environ 52,5% du bitume d'ajout par du ciment, pour plus d'information sur le Stabicol, voir section 3.0.2).

Le bitume mousse offre des stabilités Marshall témoins entre 15000 et 20000 N [HOTTE, 1995], et des pertes à la saturation de 20% à 50% (généralement entre 20 et 30%). Notons que le nombre de valeurs est limité, et que ces dernières proviennent d'un fabricant de ce produit. Les matériaux stabilisés à la mousse de bitume sont reconnus pour curer plus rapidement que ceux stabilisés à l'émulsion [WOOD et coll., 1984]. Un ajout de ciment est également possible avec la mousse de bitume.

2.3.3 Résistance en compression

Cet essai n'est pas encore utilisé au Québec dans la caractérisation des matériaux stabilisés. Néanmoins, la résistance en compression est un paramètre souvent exploité en génie civil et certains pays, comme la France, l'utilise pour fin de formulation des graves-émulsion (liant d'ajout optimal). À cet égard, le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France) demande des résultats minimum de 2 à 4 MPa selon le type de bitume contenu dans l'émulsion, avec un rapport immersion-compression $>0,55$ (pour une température de 18°C). Cet essai est communément nommé en France "essai Duriez dilaté".

Proteau rapporte des valeurs de 4 à 8 MPa pour un matériau fabriqué à partir de béton de ciment et bitumineux concassé stabilisé au CSS-1 [PROTEAU, 1995], les conditions d'essai ne sont toutefois pas rapportées. Néanmoins, il est possible que ces résultats concordent avec ceux de l'essai Duriez, car la température d'essai de 18°C est mentionnée. On ne connaît pas les conditions de cure utilisées et, en conséquence, ces valeurs sont peu utiles.

Sur des graves non recyclés, Entreprise Jean Lefebvre [GOACOLOU et coll., 1996] rapporte des résistances en compression de 4.1 et 5.1 MPa pour une grave-mousse et une grave-émulsion respectivement (18°C). Dans cette étude, les deux graves utilisaient le même granulat et la teneur en bitume d'ajout était de 3,5%. La tenue à l'eau était comparable pour les deux graves et le rapport immersion-compression se situait à environ 0,63.

La firme Colas [GODARD, 1991] rapporte des résultats de l'ordre de 8 MPa pour une grave-Stabicol 90 (liant mixte) non-recyclée à 18°C .

Loisel a réalisé des essais de compression simple sur des briquettes Marshall recyclées stabilisées à l'émulsion CSS-1 [LOISEL, 1994]. Cette étude visait à explorer la possibilité d'utiliser cet essai (compression simple) dans une procédure éventuelle de formulation. Peu d'essais ont été effectués et les résultats rapportés sont de l'ordre de 0,6 MPa. La condition d'essai n'est pas mentionnée, on suppose que les briquettes testées étaient témoins (non saturées).

2.3.4 Résistance en tension

La résistance en tension est généralement obtenue par la réalisation d'un essai nommé "essai Brésilien" ou "essai indirect de résistance en tension". Cet essai applique diamétralement une force, telle que présentée à la figure 2.1, sur un échantillon cylindrique de façon à provoquer une fissure de rupture au centre de l'échantillon. À partir de la force de compression maximum atteinte, il est possible de calculer la résistance ultime en tension du matériau.

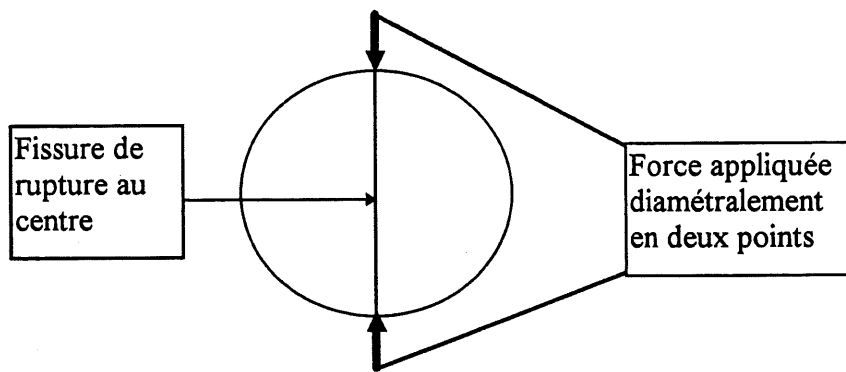


Figure 2.1 Application de la force et fissure de rupture à l'essai Brésilien

Yoder et Witczak [YODER et coll., 1975] rapportent que cet essai est utilisé avec les matériaux stabilisés (particulièrement au ciment). Ils ne présentent cependant pas de résultats et ne commentent pas cet essai. La résistance en tension des matériaux stabilisés utilisés en chaussée n'est pas un paramètre très étudié. Loisel présente cependant quelques résultats obtenus sur un matériau recyclé stabilisé à l'émulsion de bitume (CSS-1) [LOISEL, 1994]. L'étude de Loisel visait à vérifier dans quelle mesure l'essai Brésilien pouvait être, éventuellement, utilisé dans la formulation des matériaux recyclés stabilisés. Les résultats obtenus sont très faibles, de l'ordre de 50 kPa (échantillon Marshall, condition d'essai non spécifiée, mais on présume que c'est pour un état témoin).

Cette faiblesse des matériaux stabilisés à l'émulsion à l'égard de la résistance en tension est exploitée dans certains types de construction et de réfection de chaussée. On applique assez régulièrement en France une couche de matériaux stabilisés à l'émulsion sur une couche de

matériaux traités avec un liant hydraulique, ceci afin d'éviter que les fissures de retrait thermique dans ce dernier matériau remontent jusqu'à la couche de roulement (revêtement) [RÉGIS, 1985]. Il est également possible d'apposer directement sur une chaussée fissurée une couche (généralement de 200 à 250 mm) de matériau stabilisé à l'émulsion avant de paver le tout (type de réfection souvent nommé "sandwich"). La couche de matériau stabilisé agit alors comme une protection face à la réflexion des fissures.

2.3.5 Sensibilité au gel-dégel

Les matériaux stabilisés sont sensibles au phénomène de gel-dégel, c.-à-d. que leur résistance mécanique est affectée par les cycles de gel-dégel. Tous les matériaux stabilisés testés jusqu'à ce jour ont démontré une certaine baisse de résistance face au phénomène du gel, mais la sensibilité est très différente selon le type de liant utilisé. De façon générale, les liants hydrocarbonés résistent mieux aux cycles de gel-dégel que les liants hydrauliques et mixtes.

Favretti [FAVRETTI, 1994] a réalisé une étude de gel-dégel sur des matériaux stabilisés à la mousse de bitume et à l'émulsion (trois émulsions différentes; CSS-1, CMS-2 et SS-1). Certains échantillons (mousse, CSS-1 et CMS-2) avaient été prélevés en chantier, alors que d'autres (CSS-1, CMS-2 et SS-1) avaient été préparés en laboratoire. Les échantillons bénéficiaient d'une cure allongée (3 mois à l'air libre + 6 jours à l'étuve à 38°C) de façon à éviter le plus possible l'influence de la cure sur les stabilités Marshall établies en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. Les échantillons étaient alors saturés et immergés avant de subir les cycles de gel-dégel. Dans l'ensemble, les tendances observées étaient très semblables pour tous les mélanges testés, sauf dans un cas. Favretti a observé une baisse de stabilité Marshall d'environ 50% à 60% dans les 15 à 30 premiers cycles (selon le matériau testé). Par la suite, la résistance des matériaux demeurait pratiquement stable. Un des matériaux stabilisés à l'émulsion CMS-2 (il y en avait trois) n'a pas résisté à plus de 15 cycles. Ce dernier matériau avait une tenue à l'eau médiocre, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle il avait été décidé de l'employer dans cette étude. On note une augmentation de la stabilité après les 3 ou 4 premiers cycles de gel-dégel. Favretti attribue cette

hausse au "flottement" dans les résultats, ce comportement sera néanmoins observé dans d'autres études de gel-dégel avec ce type de matériau.

Construction Soter Inc. [CONSTRUCTION SOTER, 1995] a présenté une étude sur certaines propriétés de matériaux stabilisés à la mousse avec différents ajouts (ciment, chaux, fines). Une des propriétés observées est le nombre de cycles de gel-dégel résistés par les matériaux. Il est cependant dommage que le critère de résistance et les conditions d'essai ne soient pas davantage expliqués. Néanmoins, on note que l'ajout de ciment diminue le nombre de cycles résistés pour un matériau n'ayant pas de fines ajoutées, alors que l'ajout de chaux ne semble pas affecter ce critère à l'égard de ce matériau. En effet, le matériau de base a résisté à 50 cycles, alors que ceux avec ajout de ciment et de chaux ont résisté à 17 et 50 cycles respectivement. Par contre, avec l'ajout de 15% de fines, le matériau de base (sans ajout) résiste à 17 cycles, alors que les matériaux avec ajout de ciment et de chaux résistent respectivement à 24 et 41 cycles. Le granulat était un composé 50-50 de pierre de carrière et de béton bitumineux concassé recyclé.

Le MTQ a également produit une étude de gel-dégel sur un matériau stabilisé au CSS-1 et au Stabicol (liant mixte) [BEAUDOIN et coll., 1994]. On permettait une cure de 28 jours (sous pellicule plastique) avant le début de l'étude. Les matériaux ont d'abord subi 21 cycles de gel-dégel dans une condition témoin. Le matériau stabilisé au Stabicol dépassait toujours la limite de la presse Marshall (40 kN) après ces 21 cycles (on ne peut donc pas observer de tendance). On note une augmentation de 26% de la stabilité après 7 cycles pour le matériau stabilisé au CSS-1. Ce matériau gagna encore un peu de résistance entre le 7^{ème} et le 14^{ème} cycle. Par la suite, les échantillons ont été immergés (sans être préalablement saturés) pour subir une autre série de 21 cycles. On note que le matériau stabilisé au Stabicol a subi une baisse minimum (on suppose qu'il avait une stabilité Marshall de 40 kN alors que l'on ne connaît pas sa véritable résistance) de 48% après les 21 cycles immergés. On observait une baisse de stabilité Marshall de 31,5% pour le matériau stabilisé au CSS-1.

Finalement, Loisel [LOISEL, 1994] a réalisé une étude de gel-dégel avec un matériau stabilisé au CSS-1. Les échantillons subissaient une cure normalisée seulement et étaient immergés (sans subir de saturation préalable). Les stabilités Marshall étaient évaluées pour 0, 11, 15, 20, 25, 30, 35, 40,

45 et 50 cycles de gel-dégel. Il est difficile de comparer la valeur à 0 cycle et à 11 cycles, car les échantillons à 0 cycle n'avaient pas eu le temps d'être complètement saturés, alors qu'après 11 cycles (11 jours d'immersion) les échantillons ont vraisemblablement un haut taux de saturation. Néanmoins, il est possible de comparer la valeur de stabilité après 11 cycles et la stabilité après saturation sous vide de ce matériaux (sans cycle de gel-dégel). On remarque pour cette comparaison une augmentation de stabilité Marshall de 25,6%. Par la suite, la stabilité Marshall demeure relativement stable jusqu'au 20^{ème} cycle, et subit une baisse de 36% entre le 20^{ème} et le 25^{ème} cycle. Ensuite, la stabilité demeure encore une fois très stable jusqu'à la fin de l'étude.

Il semble donc que les premiers cycles de gel-dégel n'empêchent pas, et même favorisent une augmentation de la stabilité Marshall des matériaux stabilisés. Il est cependant impossible d'expliquer ce phénomène actuellement. Par la suite, les matériaux subiraient une baisse importante de résistance (pouvant dans certains cas conduire à la ruine) pour atteindre un palier relativement stable par la suite.

2.3.6 Les modules élastiques

Les modules élastiques sont des paramètres qui illustrent la relation déformation-chargement. Ils sont à la base des méthodes de conception analytique des chaussées. Par conséquent, l'obtention de valeurs typiques, pour les matériaux recyclés stabilisés, de modules élastiques, résilients et/ou dynamiques complexes sont très recherchées. Il n'est cependant pas simple d'obtenir ces valeurs. En effet, les modules des matériaux stabilisés varient en fonction de la température, du taux de chargement utilisé, de la fréquence de chargement utilisée, du niveau de la cure de ces matériaux, etc. Il faut donc porter une attention particulière aux conditions d'essai utilisées avant de comparer les valeurs présentées dans la littérature.

Le module de Young, le module résilient et le module dynamique sont tous des modules élastiques. Théoriquement, ces modules seraient comparables si tous déterminés, dans les mêmes conditions de confinement, sur un matériau parfaitement élastique. Or, les matériaux utilisés en génie civil, et particulièrement les matériaux liés avec du bitume, sont loin d'être parfaitement

élastiques. En réalité, il serait probablement préférable d'appliquer une théorie viscoélastique aux matériaux stabilisés, mais les méthodes de conception actuelles n'ont pas été développées à partir de ce type de modèle.

Le module de Young correspond au module élastique statique, c.-à-d. avec l'application d'une charge pendant un temps relativement long. Les modules résilient et dynamique complexe sont obtenus par des procédures d'essais utilisant un principe similaire: les matériaux sont soumis à des chargements cycliques et le module élastique est déterminé en fonction des résultats de déformation enregistrés. Les différences majeures de procédure entre ces deux types de modules sont la forme (triangulaire, sinusoïdale, etc) de la pulsation du chargement et la période de repos entre chaque cycle de chargement appliqué (le module dynamique complexe ne permet pas de période de repos entre chaque cycle de chargement). Le module dynamique complexe peut se décomposer en phase élastique et viscoélastique, mais on donne en générale la valeur du module dynamique (quelques fois appelé module complexe) qui correspond à la valeur absolue de la déformation enregistrée lors des essais (valeur non-décomposée). Une courbe du module est souvent présentée en fonction de la fréquence (en Hertz) de chargement. Notons que le module résilient est davantage utilisé au États-Unis, alors que l'on préfère généralement le module complexe en Europe. De plus, chacun de ces modules peut être obtenu par l'application de forces de compression, traction directe, traction par flexion et compression diamétrale (essai Brésilien ou traction indirecte). Par conséquent, lorsque l'on présente la valeur d'un de ces modules, il est important de spécifier non seulement la température et la fréquence de chargement utilisées, mais également le type d'essai réalisé. En France, le module dynamique est généralement obtenu par un essai de traction par flexion sur un échantillon trapézoïdale où la force est appliquée en tête d'une éprouvette dont la base est encastrée.

En France, on a retenu comme conditions d'essai normalisées une température de 15°C et un temps de chargement de 1/50 seconde (passage d'un poids lourd entre 60 et 80 km/heure) pour l'obtention d'un *module de rigidité* (module élastique à chargement non cyclique). Pour ces conditions, on note que les graves-émulsion obtiennent un module de rigidité entre 2500 et 5000 MPa (ces modules sont obtenus avec des temps de cure de plusieurs mois, voir plusieurs années). Il est également indiqué que les modules des assises traitées aux liants hydrocarbonés,

spécialement la grave-bitume qui est un type d'enrobé à chaud, peuvent être divisé par deux lorsque le temps d'application de la charge passe de 1/50 seconde à quelques secondes [RÉGIS, 1985]. Il ne spécifie cependant pas de relation entre ce module élastique dynamique et un module élastique statique (module de Young, temps de chargement de plusieurs minutes, comme c'est le cas pour les essais de plaque). Régis rapporte également un module élastique d'environ 4250 MPa pour une grave-bitume (15°C et 0,02 seconde). Pour fin de comparaison, notons qu'une grave-liant hydraulique permet d'atteindre un module de rigidité entre 10 000 et 40 000 MPa selon le type de liant hydraulique (ciment, chaux, laitier, cendre volante etc.) utilisé et le dosage employé [RÉGIS, 1985].

De plus, l'ajout de béton bitumineux concassé dans le granulat (granulat recyclé) diminue possiblement le module élastique des matériaux stabilisés à l'émulsion. En effet, les granulats de béton bitumineux concassé sont plus facilement déformables que ceux obtenus avec de la pierre de carrière. Par conséquent, la déformation des graves *recyclés* stabilisés sous un même chargement est probablement un peu plus importante que pour les graves *non recyclés* stabilisés. À cet égard, Proteau [PROTEAU, 1995] suggère de prendre un module entre 2000 et 3500 MPa pour un matériau recyclé stabilisé en centrale (à 15°C). Il précise toutefois que les résultats obtenus en laboratoire jusqu'à maintenant indiquent plutôt un module de 1000 MPa (conditions d'essai non-spécifiées).

L'ajout de liant hydraulique augmente naturellement le module élastique. La valeur de cette augmentation dépend du pourcentage d'ajout de liant hydraulique. La firme Colas a présenté des résultats obtenus sur une grave stabilisée au bitume (grave-bitume), au Stabicol 90, au Stabicol 50 et seulement au ciment (grave-ciment) [GODARD, 1991]. Les modules élastiques étaient obtenus pour différentes températures (-5 à +30°C). On ne précise pas la nature des modules présentés (module de rigidité ou module complexe). La variation en fonction de la température était nulle pour la grave-ciment et son module élastique se situait à environ 23000 MPa. À 15°C la grave-Stabicol 50 avait un module élastique d'environ 17500 MPa, la grave-Stabicol 90 à 12500 MPa et la grave-bitume à 8000 MPa (la grave-bitume n'est pas une grave-émulsion ni un béton bitumineux). À 30°C la grave-Stabicol 90 avait un module élastique d'environ 10 500 MPa, alors que la grave-bitume affichait un module élastique inférieur à 3000 MPa. Les valeurs de module

présentées ici pour la grave-bitume sont semblables aux valeurs types du module dynamique observé entre 1 et 10 Hertz de fréquence pour ce type de matériau [GOACOLOU et coll., 1996] [PEYRONNE et coll., 1991].

Entreprise Jean Lefebvre présente des valeurs de modules dynamiques pour un matériau stabilisé à la mousse de bitume (avec un ajout de 1% de chaux) en fonction de la température et de la fréquence de chargement [GOACOLOU et coll., 1996]. On retiendra, pour une fréquence de 10 Hertz, les valeurs approximatives de modules suivantes: 7800 MPa à 0°C, 5500 MPa à 10°C, 4000 MPa à 30°C. La valeur du module dynamique augmente avec la fréquence de chargement appliquée.

Dans le rapport sur une vaste enquête menée aux États-Unis par le NCHRP sur l'utilisation des matériaux recyclés stabilisés, Epps présente certaines valeurs du module résilient [EPPS et coll., 1990]. Il note qu'en Oregon les valeurs obtenues, à partir de sept projets utilisant une stabilisation à l'émulsion, variaient de 1000 MPa à 4100 MPa. Sur des échantillons préparés en laboratoire au Nevada, certaines relations du module résilient ont pu être observées en fonction du temps de cure et de la température. Ainsi, le module résilient augmente en fonction du temps de cure, la plus grande partie de cette augmentation est atteinte en 14 jours de cure. Le module résilient moyen était approximativement de 27500 MPa à 1°C, chutait à 1700 MPa à 25°C, et à 550 MPa à 40°C.

Certains résultats de modules obtenus sur une pierre à chaux stabilisée à l'émulsion sont intéressants [BRENNAN et coll., 1990]. Ces résultats présentent la valeur de module de rigidité en fonction du temps d'application de la charge sur des échantillons prélevés en chantier à partir d'un essai en tension directe. Le module de rigidité obtenu pour une température de 10°C et un temps d'application de 0,02 seconde est de 4400 MPa, alors qu'il se situe pour les mêmes conditions d'essai à environ 850 MPa pour un chargement de 300 secondes. Il faut cependant être prudent dans l'utilisation de ces résultats, car le résultat à 300 secondes de chargement est obtenu par diverses interpolations et extrapolations. Notons finalement que la grave prélevée en chantier avait déjà subi 5 ans de trafic et de cure.

Les résultats les plus intéressants et les plus complets proviennent de "l'Asphalt Institute" [KALLAS F., 1979]. Ce document de 57 pages présente des résultats de module résilient et dynamique sur des sables-émulsion, des graves-émulsion (divers types d'émulsions) et quelques résultats sur du béton bitumineux. Les résultats sont généralement exprimés en fonction de la température, de la fréquence de chargement, du temps de chargement appliqué ainsi que du temps de cure des échantillons. Les modules sont obtenus à partir d'essais de compression triaxiale, d'essais de traction par flexion (en trois points) et par compression diamétrale (essai Brésilien). Pour les essais de compression triaxiale, les modules sont également présentés en fonction de la somme des contraintes principales. C'est donc un document de référence particulièrement bien étoffé.

Le module résilient augmente de façon nette pendant près de trois semaines. Par la suite, cette augmentation est très faible. Les premiers essais présentés (compression triaxiale) utilisaient une forme de pulsation "haversine", un temps de chargement de 0,1 seconde et un temps de repos de 0,9 seconde à 25°C. Pour des échantillons de graviers (granulométrie respectant le fuseau du MTQ) stabilisés à l'émulsion SS-1h (% de liant d'ajout variant de 4,1 à 5,6%) curés 12 semaines, le module résilient moyen varie de 3500 MPa à 6200 MPa lorsque la somme des contraintes principales passe de 138 kPa à 1400 kPa. Les mêmes essais, mais sur un gravier concassé dont 75 à 80% en poids passaient le 5 mm stabilisé avec 5,5% de SS-1h et curé 12 semaines, montrent un module résilient ne variant pratiquement pas avec la somme des contraintes principales d'environ 2400 MPa. Le même matériau, mais après saturation, démontrait maintenant un module variant de 620 MPa à 1380 MPa lorsque la somme des contraintes principales passait de 200 kPa à 1380 kPa. Avec une stabilisation à l'aide de 7,5% de SS-1h et les mêmes conditions d'essais, on observe les mêmes tendances avec un module résilient d'environ 2760 MPa témoin, alors que le module après saturation varie approximativement de façon identique (620 à 1380 MPa pour la même plage de contraintes totales). On note également que ce gravier concassé stabilisé avec 5,5% de CMS-2 permet pour un état témoin l'obtention d'un module résilient de 2060 MPa (même condition d'essai et même tendance observée en fonction de la somme des contraintes principales), alors qu'après saturation le module varie de 585 à 1100 MPa pour la même plage de contraintes totales. On note finalement une excellente concordance entre le module dynamique à 16 Hz et résilient pour les matériaux stabilisés à l'aide de l'émulsion SS-1h (à 25°C). Avec l'émulsion CMS-

2, le module résilient est un peu plus élevé que le module dynamique à 16 Hz de fréquence (à 25°C).

Par la suite, ce document présente des valeurs de modules obtenues à l'aide d'essais de tension par flexion. Ces essais de tension par flexion sont inspirés de la procédure d'essai développée par Deacon [DEACON et coll., 1967]. Le résultat de l'essai est le module de rigidité E_s , jugé équivalent au module élastique, et est obtenu pour des conditions d'essai à 21,1°C pour une contrainte de 345 kPa. Pour des échantillons utilisant le gravier concassé comme granulat, le module E_s est de 2800 MPa pour une stabilisation avec 5,5% de SS-1h, de 3970 MPa pour une stabilisation de 7,5% de SS-1h et 2580 MPa pour une stabilisation à l'aide de 5,5% de CMS-2. Les modules dynamiques sont également présentés pour les mêmes conditions d'essais (T° et plage de contraintes). Ces modules dynamiques varient selon la fréquence de chargement utilisée. Pour une stabilisation de 5,5% de SS-1h, on note un module dynamique de 2080, 2380 et 2720 MPa pour 1, 4 et 16 Hertz respectivement. Pour une stabilisation de 7,5% de SS-1h, on présente des modules dynamiques de 1930, 2255 et 2630 MPa pour les mêmes fréquences respectives. Et finalement, pour une stabilisation de 5,5% de CMS-2, on note un module dynamique de 1400, 1655 et 1940 MPa pour les mêmes fréquences respectives.

Finalement, la procédure d'obtention de module résilient par compression diamétrale était à l'époque (en 1979) en phase expérimentale. Par conséquent, plusieurs méthodes non normalisées sont testées avec des résultats très différents. Ces valeurs ne seront donc pas présentées dans ce mémoire.

Le nombre de données présenté est relativement important et la plage de valeur assez vaste. Il est cependant possible de dégager de cette revue certaines tendances:

- Les matériaux stabilisés à l'émulsion de bitume possèdent un module dynamique à long terme compris entre 1000 et 5000 MPa (à une température approximative de 20°C). La saturation diminue la valeur du module. Le module statique est de 2 à 5 fois plus petit que le module dynamique. La présence de granulat recyclé peut diminuer légèrement la valeur du module.

- L'ajout de ciment augmente de façon importante le module d'élasticité. Les valeurs présentées par la firme Colas sont difficiles à comparer avec celles issues des autres sources, car le type de module n'est pas mentionné. Les valeurs des modules pour les graves-Stabicol nous semblent assez élevées si on les compare aux résultats obtenus sur le terrain (relevé FWD, voir chapitre 8).
- Les matériaux stabilisés à la mousse ont un module élastique semblable aux graves-émulsions, mais le nombre de données est trop limité pour se prononcer sur ce point de façon précise.

2.3.7 L'influence de la température

Les performances mécaniques, ainsi que les modules d'élasticité, des matériaux liés avec des liants hydrocarbonés sont influencés par la température. Le sujet a été régulièrement effleuré dans les sections précédentes de ce chapitre, mais dans cette section nous tenterons de dégager mathématiquement les comportements observés des modules en fonction de la température des matériaux. Naturellement, les comportements observés dans la littérature ont été obtenus à partir de granulats non recyclés. La présence de granulats de béton bitumineux concassés dans un matériau stabilisé tend probablement à faire augmenter l'influence de la température, mais il n'y a jusqu'à maintenant aucun travail permettant d'estimer ce paramètre en fonction du pourcentage de granulats recyclés utilisé. Il y a donc d'importantes limitations à l'utilisation des comportements présentés dans cette section.

Comme nous l'avons spécifié dans la section 2.3.6, l'Asphalt Institute a réalisé des études relativement poussées sur l'influence de la température sur le module résilient et dynamique pour certaines graves-émulsions. Le tableau 2.1 présente les résultats (moyens) obtenus dans cette étude en fonction de la température pour les types de granulat nous intéressant.

**Tableau 2.1 Variation de modules résilients et dynamiques
sur grave-émulsion en fonction de la température**

Type de granulat	Émulsion et % d'ajout	Température °C	Module résilient (MPa)	Module E dynamique 4 Hertz (MPa)	Variation du module/ °C (MPa)	Variation du module/ °C (%)
Gravier	SS-1h 5,60%	15,5	5385			
		26,7	2870		225	4,17%
		37,8	1475		126	4,38%
Gravier concassé (75% passant 5 mm)	SS-1h 5,50%	4,4		3805		
		21,1		2380	85	2,24%
		37,8		1668	43	1,79%
	SS-1h 7,50%	4,4		3785		
		21,1		2255	92	2,42%
		37,8		1620	38	1,69%
	CMS-2 5,50%	4,4		2940		
		21,1		1655	77	2,62%
		37,8		1145	31	1,85%
Béton bitumineux	6% de bitume	4,4		6755		
		21,1		2690	243	3,60%
		37,8		827	112	4,15%

Provenance: [KALLAS F., 1979]

La variation de module par degré Celsius en pourcentage est calculée par rapport à la valeur du module précédent (pour la température précédente). Il nous apparaît important de le souligner et de présenter un exemple de calcul, de façon à éviter toute erreur susceptible d'être engendrée par une mauvaise utilisation et/ou compréhension des variations présentées. Par exemple, supposons qu'un essai sur un matériau stabilisé avec 7,5% d'émulsion SS-1h permet d'obtenir un module dynamique de 2000 MPa à 8°C. Afin de pouvoir comparer le mieux possible ce résultat avec d'autres valeurs, on désire estimer le module à 20°C de ce matériau. Pour ce faire, il est possible d'utiliser les variations de modules présentées dans le tableau 2.1. Pour notre exemple, nous

utiliserons les variations exprimées pour le gravier concassé stabilisé avec 7,5% de SS-1h. Les variations données sont 2,42%/°C par rapport à la valeur du module à 4,4°C (entre 4,4 et 21,1°C) et 1,69%/°C par rapport à la valeur du module à 21,1°C (entre 21,1 et 37,8°C). En conséquence, il faut d'abord estimer la valeur du module à 4,4°C, avant de pouvoir déterminer la valeur approximative du module à 20°C. Ainsi:

$$\frac{2000\text{MPa}}{1 - ((8^\circ\text{C} - 4,4^\circ\text{C}) * 0,0242)} = 2191\text{MPa}$$

Par conséquent, la valeur estimée du module à 4,4°C est de 2191 MPa. Maintenant:

$$2191\text{MPa} - (2191\text{MPa} * ((20^\circ\text{C} - 4,4^\circ\text{C}) * 0,0242)) = 1364\text{MPa}$$

Donc, le module à 20°C du matériau testé serait approximativement de 1360 MPa.

Il est dommage de ne pas avoir de comparaison entre les deux types de modules sur un même granulat. Nous supposons cependant que la variation des deux modules est semblable puisqu'il avait été noté que le module résilient (à 25°C) était approximativement égal au module dynamique à 16 Hz (à 25°C). Nous avons présenté le comportement du module dynamique pour une fréquence de 4 Hz, mais la tendance (variation en pourcentage) est sensiblement la même pour les fréquences de 1 Hz et 16 Hz. Notons finalement que les échantillons de gravier avaient été curés 18 semaines, alors que les échantillons de gravier concassé avaient bénéficié d'une cure de 12 semaines.

Pour les graves-mousses, il y a peu de valeurs de modules en fonction de la température disponibles. L'Entreprise Jean Lefebvre (en France) a publié certains résultats [GOACOLOU et coll., 1996]. Il faut spécifier que l'Entreprise Jean Lefebvre détient les droits de production en France pour ce type de matériau. Encore une fois, le granulat utilisé ne contient aucun pourcentage de particules recyclées. Le tableau 2.2 présente un résumé de ces résultats. Notons que les valeurs des modules sont approximatives, car elles proviennent d'un graphique et non d'un tableau de valeurs.

Tableau 2.2 Variation de modules dynamiques sur grave-mousse en fonction de la température

Résultats publiés par l'Entreprise Jean Lefebvre

Température °C	Module dynamique E (MPa)			
	1 Hertz	Variation du module/ °C (%)	10 Hertz	Variation du module/ °C (%)
0	6800		7900	
10	5100	2,50%	6300	2,03%
15	4300	3,14%	5500	2,54%
20	3900	1,86%	5000	1,82%
25	3400	2,56%	4500	2,00%
30	2900	2,94%	3900	2,67%

Provenance: [GOACOLOU et coll., 1996]

Comme on le voit, il y a peu de différence au niveau de la tendance (variation) entre les modules calculés avec une fréquence de 1 Hz et ceux obtenus avec une fréquence de 10 Hz. Les pourcentages de variation sont légèrement plus élevés (en moyenne) que ceux présentés pour les graves-émulsions (pierre concassée).

Pour les liants mixtes, il y a encore une fois très peu de résultats fiables. Nous avons déjà présenté certaines valeurs de modules élastiques publiées par la firme Colas [GODARD, 1991] sur une grave-bitume, une grave-ciment, une grave-Stabicol 50 et une grave-Stabciol 90. C'est donc les valeurs présentées dans cet article que le tableau 2.3 utilisent. Il est important de noter que les valeurs sont encore une fois approximatives, car elles proviennent de graphiques en trois dimensions. Avec ce type de graphique (3D), il est spécialement difficile de lire avec précision les valeurs recherchées.

La stabilisation à l'aide d'un liant mixte semble donc diminuer l'influence de la température sur le module élastique, car les variations observées avec la grave-Stabicol 90 ou 50 sont moins élevées que celles obtenues avec une émulsion de bitume ou la mousse de bitume. Naturellement, plus le

pourcentage de ciment dans le liant est élevé, moins la température influence les modules d'élasticité.

**Tableau 2.3 Variation de modules élastiques
sur grave-Stabicol en fonction de la température**

Résultats publiés par la firme Colas

Température °C	Module (MPa)			
	Stabicol 50	Variation du module/ °C (%)	Stabicol 90	Variation du module/ °C (%)
0	19000		16000	
10	17500	0,79%	14000	1,25%
20	16300	0,69%	12000	1,43%
30	15200	0,67%	10500	1,25%

Provenance: [GODARD, 1991]

2.3.8 Résistance à l'orniérage

Les graves-émulsions non recyclées sont reconnues pour avoir un assez bon comportement face à l'orniérage. En effet, malgré des pourcentages de vides assez importants (de 10 à 15%) la grave-émulsion est relativement performante à l'égard du phénomène d'orniérage. Ceci est relié au fait que l'émulsion se disperse préférentiellement dans la partie fine du granulat, laissant les gros granulats pratiquement "secs" de bitume. Ceci confère aux graves-émulsions un angle de frottement interne assez élevé d'environ 40 à 50° [RÉGIS, 1985], et par le fait même une bonne résistance à l'orniérage. Malheureusement, l'apport de granulat de béton bitumineux concassé diminue cet angle de frottement interne et les matériaux *recyclés* stabilisés à l'émulsion sont moins performants que les graves-émulsions non-recyclées à l'égard de ce phénomène.

Le MTQ a réalisé une étude à l'orniéreur sur des plaques de 7,5 cm de matériaux recyclés stabilisés surmontées de 2,5 cm d'enrobé discontinu 0/10 au liant polymère [BEAUDOIN, 1994]. Un matériau recyclé stabilisé au Stabicol et un autre stabilisé au CSS-1 ont été testés. Les plaques de matériaux stabilisés ont été enveloppées d'une pellicule plastique et ont été entreposées

pendant 28 jours. Les plaques ont finalement été conditionnées à 60°C sur la pleine épaisseur pour être testées. On peut se poser de sérieuses questions sur la pertinence de cette procédure pour comparer ces deux matériaux: a-t-on permis à l'eau de s'évaporer avant la période de cure (facteur dominant pour le matériau stabilisé au CSS-1, mais pas nécessairement très important pour celui stabilisé au Stabicol)? Pourquoi avoir utilisé une température d'essai de 60°C alors qu'il est connu que l'influence de la température est plus forte pour un matériau stabilisé avec un liant hydrocarboné qu'avec un liant mixte? Dans ces conditions, une température de 30°C aurait été possiblement préférable pour fin de comparaison. Néanmoins, après 10 000 cycles la plaque de matériau stabilisé au CSS-1 présentait une ornière de 12,5%, alors que celle utilisant le matériau stabilisé au Stabicol présentait une ornière de 3,5% et 4,4% à 10 000 et 30 000 cycles respectivement. S'il est difficile de comparer ces résultats entre eux, pour les raisons évoquées préalablement, il apparaît cependant que le matériau traité au Stabicol est très résistant à l'orniérage.

On note finalement, qu'une réfection utilisant une stabilisation à l'émulsion de bitume est sensible à l'orniérage à très jeune âge, c.-à-d. pendant la période de cure avant recouvrement. Ainsi, lorsque la circulation lourde est permise pendant cette période et que les conditions de cure ne sont pas idéales (temps froid, pluie, peu de vent), il risque de se développer des ornières et des nids-de-poule dans le matériau recyclé stabilisé.

2.4 Sur le terrain

2.4.1 Essais et contrôle en chantier

Les essais et le contrôle de la qualité en chantier sont nécessaires à toutes constructions de chaussées. Actuellement, le contrôle effectué en chantier sur les matériaux recyclés stabilisés repose sur des méthodes conçues pour caractériser les sols et/ou les bétons bitumineux. Par exemple, la masse volumique en place est vérifiée par nucléodensimètre (à cause du bitume, la teneur en eau du matériau obtenue par l'appareil est faussée, il faut appliquer une correction sur la valeur obtenue afin de pouvoir obtenir une masse volumique sèche adéquate), et la valeur de référence (masse volumique sèche maximale) est déterminée par un essai conçu pour les

briquettes de béton bitumineux compactées (BNQ 2300-040). La masse volumique sèche maximale peut également être déterminée et/ou vérifiée à l'aide d'une planche d'essai réalisée sur le chantier. Ainsi, on vérifie la granulométrie avant et après extraction, les épaisseurs de stabilisation (\pm précisément selon le cas), le taux d'épandage du liant, la teneur en eau à la compaction et la masse volumique en place.

Il n'y a cependant aucun véritable contrôle pour vérifier l'avancement de la cure des matériaux stabilisés. Les appareils Dynaflect et FWD pourraient potentiellement être utilisés pour déterminer les variations de portance en fonction du temps des matériaux stabilisés, mais cette méthode serait à la fois coûteuse et peu pratique, car l'obtention des valeurs des modules avec ce type d'essais nécessite un certain temps d'analyse. Il y a présentement à la ville de Montréal un appareil simple et peu coûteux à l'étude qui pourrait, dans un avenir très rapproché, permettre de caractériser la cure de ces matériaux. Ce problème et le potentiel de cet appareil sont l'objet du chapitre 9.

2.4.2 Le carottage

Le carottage est un outil efficace et peu destructif pour vérifier un grand nombre de propriétés des bétons après la construction. Malheureusement, il est beaucoup plus difficile de carotter efficacement un matériau stabilisé qu'un béton bitumineux ou de ciment. En effet, dans la majorité des cas, les campagnes de carottage se soldent par un échec partiel ou total. Il est cependant possible d'obtenir des carottes de qualité si certaines précautions sont prises, voici trois conseils:

- Si possible faire la campagne de carottage durant l'hiver, les matériaux stabilisés gelés sont en général très faciles à extraire avec succès.
- S'il n'est pas possible d'attendre jusqu'à l'hiver, il faut utiliser une carotteuse la plus stable possible (carotteuse manuelle sans appuie stable à proscrire). Un système de carottage monté sur le chassis d'un camion est à privilégier si l'on désire avoir un haut pourcentage de réussite.
- Autant que possible, utiliser un diamètre de carottes d'au moins 150 mm.

Chapitre 3. Encadrement du projet de recherche

3.0 Les mandats ou les projets d'encadrement

3.0.1 Introduction

Comme il a déjà été mentionné dans le chapitre 1, le présent projet de recherche vise essentiellement à augmenter l'état de nos connaissances à l'égard des matériaux recyclés stabilisés. Cet objectif peut se diviser en plusieurs sous-objectifs distincts: l'application de méthodes de caractérisation reconnues sur de nouveaux matériaux, la recherche de nouvelles méthodes de caractérisation pour les matériaux étudiés, l'obtention de valeurs types pour les matériaux recyclés stabilisés, l'étude des facteurs d'influence des propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux, etc.

Naturellement, il est impensable de réaliser toutes les études utiles à l'avancement de la caractérisation et du contrôle des matériaux recyclés stabilisés dans le seul cadre d'un projet de maîtrise. Il faut également avoir à notre disposition les moyens financiers et techniques nécessaires à la réalisation des études envisagées.

Ces moyens sont devenus accessibles grâce à l'obtention de deux mandats par le département de génie civil de l'Université de Sherbrooke: un mandat avec la ville de Montréal et un mandat avec la ville de Drummondville. C'est donc à partir des propositions et des demandes contenues dans ces deux contrats que le projet de maîtrise actuel s'est développé.

3.0.2 Le projet avec la ville de Drummondville

À l'été 1995, le boulevard Lemire à Drummondville devait être réhabilité. Sa réfection était considérable, car elle ne consistait pas seulement à refaire la couche de roulement, mais également à élargir le boulevard sur certaines portions et à construire une voie cyclable en bordure de la chaussée. La conception des plans et devis était sous la responsabilité du Groupe HBA experts-conseils. Ces travaux ont été subventionnés par les volets II et III du programme Travaux

d'infrastructure Canada-Québec. La réfection de la chaussée existante utilisait la technique de pulvérisation-stabilisation en place. Pour ce faire, les services de la firme Sintra avaient été retenus et le liant utilisé était un stabilisant innovateur mixte bitume-ciment du nom de Stabicol 90. Le nombre (90) décrit la proportion en pourcentage du poids du bitume sur le poids du ciment ($M_b/M_c=90\%$). Il existe en France plusieurs grades de Stabicol (Stabicol 50, 90 et 120), mais au Québec seul le Stabicol 90 est pour l'instant utilisé. Nous nommerons donc simplement ce liant "Stabicol" pour la suite de ce mémoire sans en spécifier le grade 90. Les Laboratoires Shermont étaient responsables du suivi en chantier. Les services du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke ont été retenus dans le cadre du volet recherche et développement du projet de réfection de ce boulevard.

Les objectifs de ce volet consistaient à:

- Évaluer le comportement de la chaussée stabilisée.
- Caractériser les propriétés structurales du matériau stabilisé au niveau de son indice de portance.
- Caractériser les autres propriétés physiques et mécaniques du matériau stabilisé.
- Comparer le matériau stabilisé au liant Stabicol avec d'autres matériaux stabilisés en laboratoire et sur le terrain grâce à la réalisation d'une section de chaussée stabilisée au CSS-1.

Lors d'une réunion à l'hôtel de ville de Drummondville le 4 avril 1995, les responsabilités de l'Université de Sherbrooke ont été spécifiées. Ces spécifications sont dénommées dans ce mémoire "protocole de recherche". Les demandes, contenues dans ce protocole de recherche, spécifiaient la réalisation sur le matériau stabilisé au Stabicol et au CSS-1 des essais en laboratoire de caractérisation suivants:

- stabilité Marshall
- stabilité Marshall après dessiccation sous vide
- CBR
- essais de compression simple
- essai de fendage Brésilien (résistance en tension).

Ces essais devaient être réalisés sur des briquettes d'au moins trois densités différentes. De plus, une étude portant sur la cure sous emballage plastique d'échantillons à 1, 3, 7 et 28 jours était spécifiée. En réalité, l'étude en laboratoire effectuée à l'Université de Sherbrooke a été passablement plus développée. En premier lieu, tous les essais spécifiés ont été réalisés pour des conditions témoins et après saturation (dessiccation sous vide), et ce pour quatre procédures de compaction différentes. L'étude de cure a été réalisée avec l'essai Marshall et avec l'essai CBR. De plus, une étude de gel-dégel, de perméabilité et une étude d'extraction de bitume avec liant mixte ont également été réalisées. Il faut aussi ajouter certaines investigations spéciales en laboratoire (comme une étude sur l'application de l'essai de densité brute BNQ 2300-040 avec les matériaux recyclés stabilisés).

En plus de l'étude en laboratoire, l'Université de Sherbrooke a joué un rôle actif dans les études de formulation et dans l'évaluation du comportement de la chaussée. Pour ce faire, un plan de localisation des défauts de surface sur le boulevard avant la réfection a d'abord été effectué afin de pouvoir relier si possible l'apparition des défauts avec les conditions préalables de dégradation du boulevard (suivi à long terme). Des relevés à l'aide de l'appareil FWD (Falling Weight Deflectometer) ont été effectués pour caractériser les modules de portance des matériaux stabilisés (Stabicol et CSS-1) sur le terrain et ainsi pouvoir les comparer. Des relevés d'élévation ont été faits pour vérifier les soulèvements durant l'année. Finalement, l'état de la chaussée fut inspecté à quelques reprises.

Naturellement, ce mémoire traitera principalement des résultats d'essais en laboratoire, mais il discutera également de certains résultats obtenus sur le terrain.

3.0.3 Le projet avec la ville de Montréal

La ville de Montréal utilise les matériaux recyclés stabilisés (en centrale et en place) dans la réhabilitation de certaines rues depuis 1992. En 1995, le Laboratoire de la ville de Montréal désirait évaluer les performances des chaussées réhabilitées avec ce type de matériaux. Les matériaux recyclés utilisés étaient généralement stabilisés avec de l'émulsion de bitume (CSS-1) ou de la mousse de bitume. Dans certains cas un ajout de chaux dans le procédé était également effectué. Pour réaliser cette évaluation, les services du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke furent retenus. Le projet poursuivait initialement les objectifs suivants:

- Évaluer le comportement d'une sélection de projets de réhabilitation complétés en tentant de relier les comportements observés aux conditions prévalant lors de la réalisation.
- Évaluer la possibilité d'étendre l'utilisation de ces méthodes aux chaussées plus sollicitées.
- Optimiser ou vérifier la formulation des matériaux stabilisés à l'émulsion.

Ces objectifs furent principalement atteints par l'entremise d'une évaluation visuelle de l'état des chaussées ainsi que par des relevés de portance réalisés par l'appareil Dynaflect. De plus, une étude en laboratoire sur la formulation du matériau stabilisé à l'émulsion a été effectuée. Cependant, le mandat (et les objectifs du projet) d'évaluation des matériaux recyclés stabilisés entrepris avec la ville de Montréal devait augmenter considérablement. En effet, le Laboratoire de la ville de Montréal instituait à l'été 1995 la construction de plusieurs planches d'essais avec des matériaux recyclés stabilisés (ainsi qu'un béton bitumineux recyclé à 100%). Ce projet, véritable laboratoire de terrain, permettait la réalisation et l'investigation de plusieurs essais de caractérisation sur ces différents matériaux. L'Université de Sherbrooke fut mandatée pour effectuer des essais de chargement (essais de plaque) et pour faire une investigation de l'essai au pénétromètre (chapitre 9) dans le contrôle des matériaux recyclés stabilisés. De plus, l'Université de Sherbrooke s'engageait, par l'entremise de ce mémoire, à compiler et comparer l'ensemble des résultats obtenus sur ces planches d'essais. En plus des essais réalisés par l'Université de Sherbrooke, des relevés Dynaflect, des essais à la poutre Benkelman et des essais au FWD furent effectués.

Section 2

Étude en laboratoire sur matériaux recyclés stabilisés

Stabilisation au CSS-1 et au liant Stabicol

Projet de réfection du boulevard Lemire à Drummondville

Cette deuxième section du mémoire présente l'ensemble des études en laboratoire effectuées dans le cadre du mandat relié au projet de réfection du boulevard Lemire à Drummondville. Cette section comprend quatre chapitres:

Chapitre 4. Normes, procédures et équipements

Chapitre 5. Caractérisation des matériaux utilisés pour l'étude: provenance et propriétés physiques

Chapitre 6. Propriétés mécaniques des matériaux étudiés

Chapitre 7. Investigations diverses

Chapitre 4. Normes, procédures et équipements

4.0 Introduction

Les normes, les procédures et les équipements utilisés dans un essai influencent inévitablement les résultats obtenus. C'est pourquoi il importe, et spécialement dans un contexte de recherche scientifique, de les décrire et de les présenter. Néanmoins, dans le corps d'un texte qui présente et analyse les résultats d'un essai, ces descriptions sont souvent encombrantes pour le lecteur. Il a donc été décidé de présenter l'ensemble des normes, procédures et équipements utilisés dans un chapitre spécialement conçu à cette fin.

Ce chapitre présentera donc, essai par essai, étude par étude, les normes, dérogations, procédures et équipements qui y sont reliés. Les équipements et les procédures déjà normalisées indiqués ne seront pas présentés dans ce mémoire, car il est jugé que le lecteur peut se procurer ce matériel.

4.1 Contrôle et formulation des matériaux (sections 5.1, 5.2 et 5.3)

4.1.1 Généralités

Voici la liste des normes directement utilisées en laboratoire et sur le terrain pour les études du granulat recyclé (matériau pulvérisé) et de la formulation des matériaux stabilisés:

- BNQ 2560-010 "Granulats - Échantillonnage"
- BNQ 2560-040 "Granulat - Analyse granulométrique par tamisage"
- BNQ 2300-100 "Mélanges bitumineux - Détermination de la teneur en bitume"
- BNQ 2300-110 "Mélanges bitumineux - Détermination du filler dans le produit de l'extraction"
- BNQ 2300-040 "Mélanges bitumineux - Détermination de la densité brute et de la masse volumique des mélanges bitumineux compactés"
- BNQ 2300-045 "Mélanges bitumineux - Détermination de la densité maximale"
- BNQ 2300-060 "Mélanges bitumineux - Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes".

Il faut ajouter à cette liste la procédure de formulation [LOISEL, 1994] (basée sur "Marshall Method for Emulsified Asphalt-Aggregate Cold Mixture Design") qui n'est pas encore reconnue en tant que norme, mais qui est utilisée par le Ministère des Transports du Québec.

4.2 Caractérisation physique des matériaux étudiés (section 5.4)

4.2.1 Densité brute sèche et absorption (sections 5.4.1 et 5.4.2)

Normes

- BNQ 2300-040 "Mélanges bitumineux - Détermination de la densité brute et de la masse volumique des mélanges bitumineux compactés"
- Procédure de formulation [LOISEL, 1994] (basée sur "Marshall Method for Emulsified Asphalt-Aggregate Cold Mixture Design").

Dérogation

La procédure de formulation demande à l'égard de la saturation de maintenir un vide partiel à une pression équivalente à 100 mm de Hg. Notre montage permettait en réalité un vide nettement supérieur, car le vide partiel obtenu et maintenu équivalait à une pression variant de 12 à 16 mm de Hg.

4.3 Essais de caractérisation mécanique (chapitre 6)

4.3.1 Essai de stabilité Marshall (section 6.1)

Normes

- BNQ 2300-060 "Mélanges bitumineux - Méthode "Marshall" de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes"
- Procédure de formulation des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion de bitume [LOISEL, 1994] (basée sur "Marshall Method for Emulsified Asphalt-Aggregate Cold Mixture Design").

Échantillons

L'échantillon utilisé était la brique Marshall. La fabrication des échantillons a été effectuée tel que prescrit dans les normes ci-haut mentionnées. Cependant, quatre procédures de compaction ont été utilisées afin de créer un différentiel dans la densité des briques testées. Ces procédures de compaction sont 10, 30, 50 (procédure normalisée) et 60 coups de marteau Marshall par face de briques. Les masses de granulat sèches étaient de 1000, 1075, 1100 et 1100 grammes pour les procédures de compaction de 10, 30, 50 et 60 coups de marteau par face respectivement. Le mesurage des briques a été fait avec un vernier précis à 0,001 pouce (0,0254 mm). Chacune des dimensions désirées (diamètre et hauteur) était prise à trois endroits différents situés à 120° d'intervalle tout autour de la brique.

4.3.2 Étude de curage avec l'essai Marshall (section 6.2)

Normes

Les mêmes normes que celles mentionnées à la section précédente (4.3.1).

Échantillons

Les mêmes qu'à la section 4.3.1.

Curage

Tous les échantillons ont d'abord été soumis à une cure normalisée, c.-à-d. 24 heures dans leur moule et 24 heures dans l'étuve ventilée à 38°C. Ensuite, chacune des briques a été scellée par au moins trois épaisseurs de papier plastique et mise, en groupe de six, dans un sac de plastique protecteur. Cette étape visait à éviter toute évaporation ou apport d'humidité dans le temps. Finalement, les briques emballées ont été entreposées dans une chambre à température (23°C) et humidité (50%) contrôlées pour des périodes différentes. Ces périodes (ou types de cure) ont été:

- cure normalisée (résultats obtenus avec l'essai de stabilité Marshall, section 6.1)
- cure normalisée + 2 jours dans la chambre (CSS-1 et Stabicol)
- cure normalisée + 4 jours dans la chambre (Stabicol seulement)
- cure normalisée + 6 jours dans la chambre (CSS-1 (2 lots) et Stabicol)

- cure normalisée + 27 jours dans la chambre (CSS-1 et Stabicol).

Procédure spéciale d'essai pour certaines briquettes stabilisées au Stabicol

L'anneau de charge sur la presse Marshall était conçu pour supporter un chargement de 6000 lb (environ 27 kN). Les briquettes compactées avec les procédures 50 et 60 coups/face stabilisées au Stabicol dépassaient ce chargement. Afin d'éviter un bris d'équipement, ces briquettes ont été testées avec les mâchoires Marshall, mais sur une autre presse (presse Baldwin, voir section 4.3.4 pour plus de détails). Le montage sur cette presse ne nous permettait pas de prendre la déformation à la rupture. De plus, cette presse n'était pas conçue pour provoquer un chargement à vitesse constante (comme spécifié dans la norme BNQ 2300-060), mais plutôt un chargement à pression (hydraulique) constante. Néanmoins, il fut possible d'effectuer les essais par approximation de la vitesse de chargement spécifiée (50,8 mm/minute). Malgré tous nos efforts, il est bien évident que l'utilisation de cette presse n'a pas permis d'atteindre exactement les résultats que nous aurions obtenus avec la presse Marshall normalisée.

Les briquettes bénéficiant d'une cure normalisée + 4 jours ont été testées par inadvertance sur la presse normalisée Marshall. Par chance, il n'y a eu aucun bris d'équipement. Cette "erreur" nous a permis d'estimer statistiquement l'écart moyen entre les résultats provenant de la presse normalisée Marshall et la presse Baldwin. Ainsi, les résultats obtenus avec l'utilisation de la presse Baldwin ont pu être corrigés en fonction de cet écart moyen. La section 7.5 présente la procédure et les résultats relatifs à cette analyse statistique de correction.

4.3.3 Essai Brésilien (section 6.3)

Norme

- ASTM D 4123-82 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures"

Échantillons

Les mêmes qu'à la section 4.3.1.

Équipement

La presse utilisée était de marque RIEHLE (capacité 300 000 lb), précision utilisée 12,5 lb.

4.3.4 Essai de compression simple (section 6.4)

Norme

- BNQ 2622-912 "Bétons - Détermination de la résistance à la compression de cylindres moulés"

Déroptions

En premier lieu, les échantillons utilisés ne correspondaient pas aux dimensions spécifiées. De plus, il a été impossible d'atteindre (en moyenne) le taux de chargement prescrit par la norme pour les briquettes stabilisées au CSS-1.

Échantillons

Les mêmes qu'à la section 4.3.1.

Équipement

La presse utilisée était une presse de marque Baldwin modèle TEG, capacité 60 000 lb, précision utilisée 10 lb.

4.3.5 Essai CBR (section 6.5)

Normes

- ASTM D 1883-73 "Standard Test Method for Bearing Ratio of Laboratory-Compacted Soils"
- BNQ 2501-255 "Sols - Détermination de la relation teneur en eau-masse volumique - essai Proctor modifié".

Dérogation

La norme spécifie une pénétration à une vitesse approximative de 1,27 mm par minute, la presse utilisée provoquait une pénétration à une vitesse constante de 1,14 mm par minute. Une vitesse de pénétration trop lente tend à diminuer la valeur des indices CBR obtenus.

Échantillons

Les échantillons utilisés pour cet essai possédaient les dimensions prescrites par la norme, c.-à-d. environ 150 mm de diamètre par 115 mm de hauteur. La procédure de compaction a cependant été modifiée. En effet, la norme spécifie que les échantillons doivent être préparés selon les procédures du "Proctor standard" ou "Proctor modifié" (selon le choix). Toutefois, le marteau utilisé pour l'essai Proctor ne permettait pas d'atteindre le niveau de densité désiré. En conséquence, le marteau mécanique Marshall a été utilisé manuellement afin d'obtenir des pourcentages de compaction plus élevés. La compaction s'est toujours effectuée en cinq couches.

Pour l'étude sur la variation de densité (section 6.5.2), le nombre de coups de marteau par couche était variable. Plus spécifiquement, le nombre de coups de marteau par couche pour le matériau stabilisé au CSS-1 variait de 15 à 60, et pour le matériau stabilisé au Stabicol de 10 à 55 coups.

Pour l'étude sur la variation du curage, le nombre de coups de marteau par couche était de 60 et 55 pour le matériau stabilisé au CSS-1 et au Stabicol respectivement.

Finalement, pour les essais réalisés sur le matériau pulvérisé (sans stabilisation), le marteau Proctor modifié a été utilisé. Le nombre de coups de marteau variait de 10 à 56 coups par couche (cinq couches).

Teneur en eau prémix et teneur en eau à la compaction

Normalement (tel que prescrit par la procédure de formulation), la teneur en eau à la compaction désirée est obtenue par évaporation de l'eau en surplus (ou ajout s'il en manque). En effet, lorsque la teneur en eau après malaxage est supérieure à la teneur en eau de compaction, il faut assécher le mélange jusqu'à ce qu'il soit à la bonne teneur en eau. Cette procédure permet d'atteindre à la fois un bon enrobage des granulats et une excellente compaction.

Toutefois, la quantité de matériau nécessaire à la fabrication d'un échantillon CBR est relativement importante (environ 5,5 kg). Puisque dans notre cas il fallait perdre près de 2,5% en teneur en eau, plusieurs heures étaient nécessaires pour atteindre la teneur en eau de compaction désirée. Ce temps de séchage ne causait pas de véritable problème avec le matériau stabilisé au CSS-1, mais le matériau stabilisé au Stabicol démontrait une certaine prise non négligeable. Par conséquent, la teneur en eau prémix fut ajustée à la teneur en eau à la compaction (c.-à-d. pour 5,5%) et ce, pour les deux matériaux. Naturellement, la teneur en eau prémix était modifiée de façon importante, passant de 6% à environ 3,5%. Face à cette situation, une baisse du pourcentage d'enrobage était redoutée, spécialement pour le matériau stabilisé au CSS-1. En effet, une diminution du pourcentage d'enrobage des granulats affecte inévitablement les propriétés physiques et mécaniques des matériaux stabilisés. Cependant, la qualité et l'énergie de malaxage démontrées par le malaxeur mécanique ont permis de conserver un excellent enrobage des granulats. Cette observation dénote que, si la teneur en eau de malaxage est un des critères qui influencent le pourcentage d'enrobage, la qualité du malaxage joue également un rôle prépondérant. Le résultat de la teneur en eau prémix obtenu lors de la formulation ne serait en réalité valable que pour les conditions de malaxage spécifiquement utilisées lors de la formulation.

Curage des échantillons

En premier lieu, il est nécessaire de spécifier que tous les échantillons CBR doivent demeurer dans leur moule respectif jusqu'à la fin de l'essai. Par conséquent, le curage des matériaux stabilisés devait s'effectuer à l'intérieur des moules.

Pour l'étude sur la variation du pourcentage de compaction, les échantillons étaient entreposés dans une chambre à température (23°C) et humidité (50%) contrôlées après leur fabrication. Ils

demeuraient à cet endroit pendant deux jours (48 heures) pour les essais CBR sans immersion, alors qu'ils étaient immergés dans l'eau après 24 heures pour les essais CBR avec immersion.

Pour l'étude sur la variation du curage, les échantillons étaient mis dans une étuve ventilée à 38°C pour des temps variables. Ces temps de cure étaient de 0, 24, 48, 72 et 168 heures. Pour les essais CBR avec immersion, les échantillons étaient introduits dans l'eau après la période de cure dans l'étuve.

Équipement

La presse utilisée était de marque Wykeham Farrance Eng. LTD, sa capacité était de 5 tonnes impériales (4545 kg). La cellule de charge utilisée était de marque Interface et avait une capacité de 10,000 lbs (4545 kg). L'acquisition de données était précise à la livre (0,454 kg) près.

4.3.6 Étude de gel-dégel (section 6.6)

Normes

- BNQ 2300-060 "Mélanges bitumineux - Méthode "Marshall" de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes"
- Procédure de formulation des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion de bitume [LOISEL, 1994] (basée sur "Marshall Method for Emulsified Asphalt-Aggregate Cold Mixture Design").

Équipement

L'appareil cyclique de gel et dégel était une petite chambre isolée, munie d'un système de refroidissement et de chauffage permettant un cycle de gel-dégel sur 24 heures à des températures extrêmes de -18°C à +18°C. L'humidité à l'intérieur de la chambre n'était pas contrôlée.

Fabrication et type d'échantillons utilisés

Puisque cette étude utilise la stabilité Marshall comme indicateur de la sensibilité des matériaux étudiés à l'égard des cycles de gel-dégel, l'échantillon utilisé est la briquette Marshall.

Les briquettes ont été fabriquées à partir d'une masse sèche de granulat de 1150 grammes. La teneur en eau prémix, la teneur en eau à la compaction et la teneur en liant d'ajout sont les mêmes que celles utilisées pour les autres essais utilisant la briquette Marshall, c.-à-d. respectivement 6%, 5,5% et 3,6%. La procédure de compaction est de 50 coups de marteau par face (procédure normalisée). Les dimensions moyennes approximatives des briquettes sont d'environ 66 mm d'épaisseur par 100 mm de diamètre. En tout, 72 briquettes (36 pour chaque matériau étudié) ont été fabriquées pour cette étude.

Curage préalable et conditionnement des briquettes

Les briquettes utilisées pour cette étude ont d'abord subi une cure normalisée (24 heures dans les moules et 24 heures dans l'étuve à 38°C). Par la suite, elles ont bénéficié de 28 jours de cure dans une chambre à température (23°C) et humidité (50%) contrôlées, ceci afin de minimiser l'influence du curage dans les résultats futurs. Les briquettes n'étaient pas scellées sous pellicule plastique.

Douze briquettes (6 stabilisées au CSS-1 et 6 stabilisées au Stabicol) ont alors été testées, la moitié témoin et la moitié après saturation. Ces résultats étaient nécessaires pour connaître la valeur de stabilité Marshall initiale (valeur de référence après 28 jours de cure). Douze autres briquettes ont été conservées dans la chambre à température et humidité contrôlées pendant 50 jours supplémentaires. Elles ont alors été testées de la même façon, ces résultats nous permettant de connaître la valeur de stabilité Marshall après 78 jours de curage et aucun cycle de gel-dégel.

Douze briquettes stabilisées au Stabicol et douze briquettes stabilisées au CSS-1 ont été immédiatement et simplement (après 28 jours de cure) déposées sur leur tranche dans l'appareil cyclique de gel-dégel. Les autres briquettes (douze pour chaque matériau) ont subi une saturation sous vide pendant une heure et ont été insérées individuellement dans des sacs de plastique remplis d'eau et déposées sur leur tranche dans l'appareil cyclique de gel-dégel. Douze briquettes (3 CSS-1 dans l'air, 3 CSS-1 saturées immergées, 3 Stabicol dans l'air et 3 Stabicol saturées

immergées) ont été testées après 10, 20, 30 et 50 cycles de gel-dégel. Avant d'être testées, les briquettes demeuraient 24 heures à une température de 22°C afin de s'assurer qu'elles étaient entièrement dégelées.

4.4 Investigations diverses (chapitre 7)

4.4.1 Étude d'extraction de bitume (section 7.1)

Normes

Les normes utilisées sont:

- BNQ 2300-100 "Mélanges bitumineux - Détermination de la teneur en bitume"
- BNQ 2300-110 "Mélanges bitumineux - Détermination du filler dans le produit de l'extraction".

Nous n'avons pas effectué de dérogation aux normes. Cependant, nous avons fait sécher les échantillons stabilisés à 93°C, alors que le Ministère des Transports du Québec avait émis une note à l'effet de faire sécher les matériaux stabilisés à l'émulsion de bitume à 60°C pour les essais d'extraction de bitume sur ce type de matériau. Cet écart de température peut avoir eu une légère influence sur les résultats en durcissant et en oxydant légèrement le bitume présent dans les échantillons. Cependant, tous les échantillons testés ayant subi ce traitement, les résultats comparatifs de l'étude ne sont vraisemblablement pas faussés.

Granulat utilisé

Pour diminuer les facteurs de variation dans le résultat de l'essai, l'utilisation d'un granulat conventionnel a été préféré à celle d'un produit de pulvérisation. Une pierre concassée 0-20 mm, provenant de la carrière de Sintra à Sherbrooke, a donc été utilisée. La pierre a d'abord été séchée et séparée sur les tamis de 20 mm, 14 mm, 10 mm, 5 mm et passant 5 mm. Des masses sèches de 2000 grammes de pierre ont été reconstituées selon les proportions indiquées dans le tableau qui suit. Notons que cette granulométrie reconstituée correspond à celle de la pierre utilisée, et qu'elle respecte le fuseau granulométrique du Ministère pour les produits stabilisés.

Tamis (mm)		Pourcentage
Retenu	Passant	%
20		2
14	20	19
10	14	16
5	10	19
	5	44
	Total	100

Fabrication et curage des échantillons

Cette étude a été effectuée sur des mélanges stabilisés à l'aide d'émulsion CSS-1 et du liant Stabicol. En tout, douze échantillons (6 stabilisés au CSS-1 et 6 stabilisés au Stabicol) ont été fabriqués et testés. La teneur en liant était fixée à 3,6%. Par conséquent, les mélanges stabilisés au CSS-1 avaient 3,6% de bitume alors que les mélanges stabilisés au Stabicol avaient 1,705% de bitume (et 1,895% de ciment).

L'eau prémix était ajustée de façon à obtenir une teneur en eau finale (eau prémix + eau contenue dans l'émulsion ou Stabicol) après malaxage de 5,25%. Le pourcentage d'enrobage s'est avéré excellent, dépassant vraisemblablement 80% avec le CSS-1 et atteignant près de 100% pour le Stabicol.

Six mélanges (3 au CSS-1 et 3 au Stabicol) ont été malaxés, laissés au repos sur une table pendant 1 heure (simulant ainsi un temps minimum de transport entre le chantier et le laboratoire) et ont été séchés pendant 24 heures à l'étuve à 93°C. Finalement, les essais d'extraction ont été réalisés.

Les six autres mélanges ont été compactés à une teneur en eau de 5,25% en briquettes de 150 mm de diamètre par environ 55 mm de hauteur (compaction dans des moules Proctor de 150 mm de diamètre) et ont été curés dans les conditions suivantes:

- Jours 1 à 5: curage à l'étuve à 38°C.
- Jour 6: ajout de 100 grammes d'eau par briquettes (même les briquettes avec CSS-1), curage dans une chambre à 23°C et 50% d'humidité.

- Jours 7 à 10: curage à l'étuve à 38°C.
- Jours 11 et 12: ajout de 100 grammes d'eau par briquettes (même les briquettes avec CSS-1), curage dans la chambre 23°C et 50% d'humidité.
- Jour 13: séchage à 93°C.
- Jour 14: essais d'extraction.

Cette cure un peu spéciale permet de simuler la compaction en chantier, le séchage du matériau stabilisé avant recouvrement et deux cycles de séchage-mouillage (pas à 100%). Ces conditions permettent vraisemblablement une bonne hydratation du ciment.

4.4.2 Étude de perméabilité (section 7.2)

Matériel utilisé

Le moule est en acier et possède une section voisine de 81 cm², sa hauteur étant de 115,97 mm. Les pierres poreuses, situées aux deux extrémités du moule, sont en acier inoxydable et sont de type grossier. Deux papiers-filtres, un à chaque extrémité, viennent protéger les pierres poreuses. Ils sont de marque Whatman et de type 1.

Un plateau situé sur le moule permet de charger l'échantillon, à l'aide de poids que l'on pose dessus. Un comparateur précis au centième de millimètre permet de connaître la déformation axiale de l'échantillon.

Deux systèmes de réservoirs, tubulures, vannes et détendeurs permettent d'appliquer une pression et une contre-pression aux faces inférieures et supérieures de l'échantillon. Les pressions peuvent atteindre jusqu'à 1000 kPa environ, avec une précision voisine du kPa. Cependant, cette pression maximale est théorique et, dans la pratique, on veille à ne pas dépasser 700 kPa. Ces pressions sont ajustées à l'aide de deux manodétendeurs, qui commandent chacun la pression dans les circuits de pression et de contre-pression. Les pressions d'eau dans les deux circuits de pression et de contre-pression peuvent être égalées lorsqu'on relie ces deux circuits.

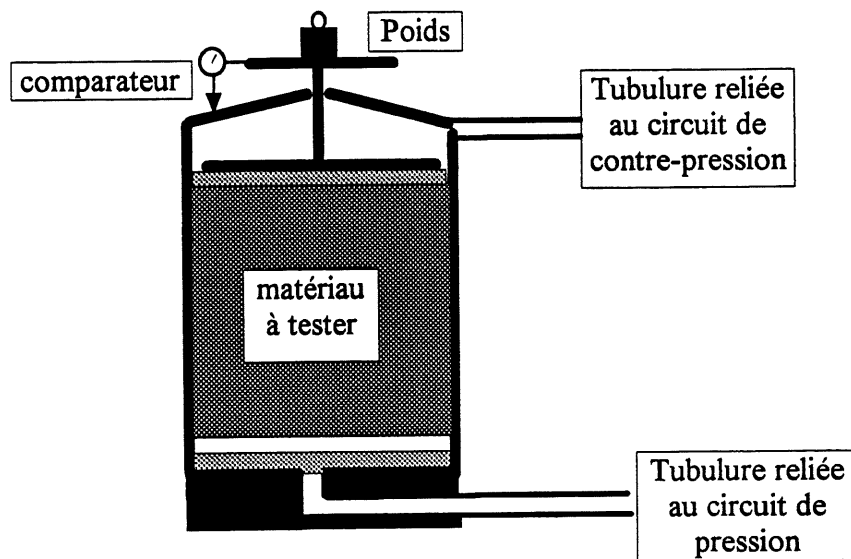


Figure 4.1 Schéma simplifié du moule du perméamètre

L'eau sortant du perméamètre, par la face supérieure normalement, est envoyée dans un ballon isolateur, placé dans une enceinte indéformable remplie d'eau. Ainsi, si une certaine quantité d'eau sort du perméamètre, le ballon se gonfle et un même volume d'eau, propre, s'écoule vers l'aval du circuit. Un dispositif permet de mesurer précisément l'écoulement à l'aval de l'enceinte précédente, par déplacement de kérosène. Sa précision est de 0,1 ml, mais l'écoulement maximal que l'on peut mesurer est de 50 ml, avant de devoir inverser le sens de l'écoulement du kérosène. C'est pour cela que les réservoirs sous pression des circuits de pression et de contre-pression ont été gradués : pour évaluer avec une précision moindre le niveau d'eau dans chaque réservoir et donc pouvoir accéder à l'écoulement qui a eu lieu au travers de l'échantillon pendant des durées relativement longues lorsque la capacité de 50 ml ne suffit plus. Les réservoirs remplis d'eau des circuits de pression et de contre-pression ont été calibrés afin de pouvoir relier le niveau d'eau dans les réservoirs avec le volume écoulé au travers de l'échantillon.

Fabrication des échantillons

Des masses sèches de 3000 grammes de granulats étaient préparées et mélangées avec les dosages de teneur en eau à la compaction et de liant usuels (5,5% de teneur en eau et 3,6% d'ajout de liant). Les matériaux étaient compactés en trois couches à l'aide du marteau Marshall mécanique (diamètre approximativement égal à celui du moule), mais utilisé manuellement. Le nombre de

coups de marteau par couche était respectivement de 30, 40 et 50 coups pour les première, deuxième et troisième couches. Les échantillons étaient ensuite curés dans leur moule pendant 168 heures dans une étuve ventilée à 38°C.

Préparation

Le moule est nettoyé, les joints sont inspectés, nettoyés puis enduits de silicone pour assurer une barrière hydraulique efficace. Les pierres poreuses sont nettoyées dans un bain ultrasonique et on vérifie leur faible résistance à l'écoulement. Le bas du moule est saturé, de sorte que la pierre poreuse luisse, sans toutefois qu'une couche d'eau ne se forme au-dessus. Le capteur de pression est réglé à zéro en le reliant à l'air atmosphérique. Le réservoir de pression est rempli d'eau alors qu'on ne laisse qu'une faible quantité d'eau dans le réservoir de contre-pression, destiné à recevoir l'eau sortant de l'échantillon.

Montage

On ferme le moule en vissant le couvercle, puis on installe le comparateur qui permettra de connaître les déformations axiales de l'échantillon. On applique ensuite une contrainte de 12,1 kPa sur l'échantillon de sol, par l'intermédiaire d'un plateau sur lequel on vient déposer des poids. Cette charge ne vise pas à comprimer l'échantillon, mais simplement à lui appliquer une charge totale supérieure à la charge hydraulique que l'on compte appliquer lors des essais de perméabilité. Lorsqu'on utilise la contre-pression, cette charge est augmentée pour prendre en compte le diamètre de la tige verticale qui est reliée à la pierre poreuse. En effet, la contre-pression ne s'applique pas sur cette tige.

L'espace libre entre l'intérieur du couvercle du moule et le dessus de l'échantillon est rempli d'eau sous faible pression. On prend soin de ne pas emprisonner d'air lors du remplissage. On connecte ensuite des tubulures remplies d'eau, reliées au circuit de pression et de contre-pression aux faces inférieure et supérieure de l'échantillon respectivement. On est alors prêt à démarrer l'essai.

Procédure d'essai de perméabilité

Si on veut déterminer la perméabilité sans contre-pression, on applique simplement une pression de 10 kPa à la base, et on suit le rythme de sortie d'eau par le haut de l'échantillon. On peut ensuite commencer à appliquer une contre-pression.

On commence alors à appliquer une pression d'eau croissante, égale aux deux extrémités, les circuits de pression et de contre-pression étant interconnectés. Plus spécifiquement, on procède par paliers de 25 kPa de pression, afin que la montée se fasse progressivement. À chaque palier, on note la déformation axiale de l'échantillon et sa variation éventuelle dans le temps. On laisse écouler de 2 à 3 minutes entre chaque palier. Tous les 100 kPa, on détermine la perméabilité. Pour mesurer la perméabilité, on utilise les deux systèmes de mesure d'écoulement, soit le système par déplacement de kérosène, précis à 0,1 ml, et le système par lecture du niveau d'eau dans les réservoirs.

Généralités

La perméabilité est déterminée sous une charge constante par la vitesse d'écoulement de l'eau, en aval de l'échantillon, lorsqu'un différentiel de pression est imposé entre les circuits de pression et de contre-pression. Ce différentiel de pression est également appelé charge hydraulique. On impose une charge hydraulique de 10 kPa, ce qui crée un gradient voisin de 9 au travers de l'échantillon et force un écoulement ascendant. La perméabilité est ensuite calculée avec la formule :

$$k = \frac{Q L}{t h A} \quad (4.1)$$

où

k est la perméabilité en cm/s

Q est le débit écoulé en cm³ pendant le temps t

L est la hauteur de l'échantillon en cm

t est le temps en secondes

h est la charge hydraulique en cm d'eau

A est la section de l'échantillon en cm²

Cette valeur de perméabilité n'est pas corrigée pour la température T , car on ne connaît pas la température exacte de l'eau dans le circuit. On néglige alors cette correction qui, étant donné les variations de température relevées dans le laboratoire, changerait la valeur de perméabilité de 0,1% environ.

On attend en fait qu'un volume minimal de 10 cm^3 se soit écoulé. Plusieurs valeurs d'écoulement en fonction du temps sont relevées, ceci afin de pouvoir toujours vérifier la valeur de perméabilité. À la fin de chaque essai de perméabilité, le système de mesure d'écoulement est déconnecté.

Déchargement

Une fois les différentes mesures de la perméabilité effectuées, on peut entamer la procédure de déchargement de l'échantillon. On diminue progressivement les pressions et contre-pressions appliquées. On enlève, en même temps et parallèlement, les charges axiales qui servaient à corriger la contre-pression pour le diamètre de la tige sur laquelle ne s'appliquait pas la contre-pression. On décharge ensuite complètement l'échantillon et on peut ouvrir le moule. On vérifie visuellement que l'échantillon ne présente pas de fissures, ou n'est pas décollé de la surface latérale du moule. L'échantillon est extrait du moule. On vérifie ensuite visuellement les papiers-filtres. Aucun dépôt susceptible de le colmater ne doit s'y trouver.

Quelques rappels concernant l'utilisation de la contre-pression

La contre-pression force normalement la saturation de l'échantillon. Les valeurs de contre-pression à appliquer dépendent du degré de saturation initial. On peut citer la formule de Lowe et Johnson (1964) :

$$P_{100} = 49P_i(1 - S_i) \quad (4.2)$$

où

P_i est la pression initiale, généralement la pression atmosphérique

S_i est le degré de saturation initial.

Mais il faut aussi du temps. Normalement, la perméabilité augmente lorsque le degré de saturation tend vers 100%. Si les paliers de contre-pression sont appliqués rapidement, la perméabilité

devrait augmenter à chaque palier pour se stabiliser à partir d'une certaine contre-pression, l'échantillon atteignant la saturation.

La perméabilité d'un échantillon saturé est plus forte que la perméabilité d'un échantillon non saturé, car la présence d'air ralentit normalement l'écoulement.

4.4.3 Étude sur la teneur en eau après curage (section 7.3)

Normes

La fabrication, le curage et le séchage se sont effectués comme le prescrit la procédure de formulation des matériaux recyclés stabilisés [LOISEL 1994], qui est basée sur "Marshall Method for Emulsified Asphalt-Aggregate Cold Mixture Design". Suivant cette procédure, la teneur en eau après curage est déterminée par séchage à l'étuve des échantillons à une température de $93^{\circ}\text{C} \pm 7$ pendant 24 heures ou masse constante.

4.4.4 Étude sur l'utilisation de l'essai de densité brute (section 7.4)

Norme

La norme utilisée est:

- BNQ 2300-040 "Mélanges bitumineux - Détermination de la densité brute et de la masse volumique des mélanges bitumineux compactés"

Les autres essais effectués pour cette étude ne sont pas normalisés. Par conséquent, cette section décrit la procédure d'essai et de calcul suivie pour l'obtention des résultats présentés à la section 7.4.3. Les briquettes étaient séchées à 60°C pendant 24 heures après chaque essai où une immersion était nécessaire de façon à sécher le plus complètement possible les briquettes, sans toutefois provoquer une oxydation excessive du bitume.

Détermination de la densité par un essai d'immersion de 10 secondes

En réalité, les échantillons ne sont pas véritablement immergés pendant 10 secondes, ils le sont plutôt pendant un temps minimum durant lequel la balance électronique s'ajuste. Puisque le temps requis est approximativement de 10 secondes, nous avons nommé ainsi cet essai. Le phénomène d'absorption d'eau étant très fort durant les premières secondes d'immersion, le poids dans l'eau ne se stabilise pas véritablement (la masse augmente toujours un peu). Malgré cela, il est possible de noter la pesée dans l'eau avec une précision respectable (moins de 0,5 gramme d'erreur).

Mis à part le temps d'immersion, cet essai suit à la lettre la procédure et les calculs de la norme BNQ 2300-040.

Détermination de la densité par dimensionnement des échantillons

Le diamètre et l'épaisseur de chacune des briquettes ont été mesurés à l'aide d'un vernier précis au 0,001 pouce (0,025 mm) à trois endroits situés à 120° l'un de l'autre. Puisque les briquettes utilisées pour cette étude sont celles ayant servi pour l'étude sur la teneur en eau après curage, la masse utilisée correspond à la masse sèche obtenue lors de la détermination de la teneur en eau. La manipulation des briquettes faisant perdre une certaine masse de granulats à la surface de celles-ci, il était alors préférable d'utiliser la masse sèche obtenue avant leur manipulation. La masse volumique est ensuite calculée comme suit:

$$M.V. = \frac{M_A}{V} \quad (4.3)$$

M.V. = Masse volumique

M_A = Masse dans l'air (obtenue lors de la détermination de la teneur en eau après curage)

V = Volume calculé à partir du diamètre et de l'épaisseur de la brique

La masse volumique calculée pour un volume unitaire correspond à la densité.

Détermination de la densité par immersion des échantillons paraffinés

Le but de cet essai est d'empêcher l'absorption de l'eau par les briques lors de leur immersion. La paraffine joue donc un rôle d'imperméable pour la brique. Afin d'obtenir la densité de la brique seule, et non celle de la "brique + la paraffine", il faut corriger les masses obtenues en tenant compte de la densité et de la masse de paraffine appliquée sur chaque échantillon. Pour ce faire il faut:

- ⇒ déterminer la densité de la paraffine;
- ⇒ peser la brique dans l'air avant paraffinage;
- ⇒ paraffiner la brique;
- ⇒ peser la brique paraffinée dans l'air;
- ⇒ peser la brique paraffinée dans l'eau.

Il faut porter une attention particulière à ne pas perdre de masse lors de la manipulation de la brique pour la paraffiner. De plus, la paraffine doit être maintenue très chaude et il faut s'assurer qu'aucune bulle d'air ne demeure emprisonnée entre la paraffine et la brique. Il est maintenant possible de connaître la masse de paraffine dans l'air et dans l'eau par ces simples calculs:

$$M_{pA} = M_{bpA} - M_{bA} \quad (4.4)$$

M_{pA} = Masse de la paraffine dans l'air

M_{bpA} = Masse de la briquette paraffinée dans l'air

M_{bA} = Masse de la briquette seule dans l'air

$$M_{pE} = - \left(\cancel{M_{pA}} / D_p \right) + M_{pA} \quad (4.5)$$

M_{pE} = Masse de la paraffine dans l'eau

D_p = Densité de la paraffine

Ayant déterminé la masse de la paraffine dans l'eau par l'équation 4.4, il est possible de corriger la masse de la briquette paraffinée dans l'eau afin d'obtenir la masse dans l'eau de la briquette seule, mais sans aucune absorption d'eau. Il est alors possible de calculer une densité ainsi:

$$D_B = \frac{M_{bA}}{(M_{bA} - M_{bE})} \quad (4.6)$$

D_B = Densité

M_{bE} = Masse de la briquette dans l'eau (obtenue en corrigeant la masse de la briquette paraffinée dans l'eau)

Ce résultat ne peut être directement comparé à la densité brute sèche calculée avec l'essai BNQ 2300-040. En effet, il est impossible de connaître la masse SSS de la briquette puisqu'elle est paraffinée. Néanmoins, les masses obtenues et calculées serviront pour déterminer la densité brute théorique. Soulignons finalement que cet essai a été réalisé le dernier, car les briquettes ne sont plus utilisables après leur paraffinage.

Détermination de la densité par immersion théorique

Comme il est discuté dans la section 7.4.1, l'erreur potentiellement engendrée lors de l'essai normalisé BNQ 2300-040 est liée aux phénomènes d'absorption (lors de l'immersion dans l'eau) et de désorption (avant la pesée SSS). Ces phénomènes influencent la valeur de la différence "masse SSS - masse dans l'eau" dans la formule de la densité brute. Le phénomène d'absorption

n'est pas un problème s'il y a absence de désorption avant la pesée SSS. Or, il semble évident qu'une partie de l'eau absorbée durant l'immersion s'échappe de la brique lors de l'assèchement de sa surface (dans un linge humide, voir norme BNQ 2300-040). Il est cependant impossible de déterminer la quantité d'eau qui s'échappe alors. Cependant, en prenant les masses obtenues lors de l'essai normalisé et lors de l'essai par immersion d'échantillons paraffinés, il est possible de calculer une masse SSS théorique qui ne serait pas influencée par le phénomène de désorption. Il faut pour cela calculer la masse d'eau absorbée et l'additionner à la masse sèche dans l'air, le résultat correspond à la masse SSS théorique.

Voici comment on y parvient. Connaissant la masse dans l'eau de la brique non paraffinée et paraffinée, il est possible de calculer la quantité d'eau que la brique a absorbée lors de la réalisation de l'essai normalisé. Il faut cependant corriger la masse dans l'eau de la brique paraffinée en fonction de la perte de matériau, provoquée par la manipulation des briques entre la réalisation des deux essais. Cette perte est connue en faisant la différence des masses de la brique dans l'air obtenues dans les deux essais. Donc, la masse d'eau absorbée est calculée comme suit:

$$M_{EA} = M_{EN} - \left(M_{bEp} - \left((M_{AN} - M_{bAp}) / D_B \right) \right) \quad (4.7)$$

M_{EA} = Masse d'eau absorbée lors de l'immersion dans l'eau pour l'essai normalisé

M_{EN} = Masse dans l'eau obtenue lors de l'essai normalisé

M_{bEp} = Masse dans l'eau corrigée (brique seule) obtenue lors de l'essai par immersion d'échantillons paraffinés

M_{AN} = Masse dans l'air obtenue lors de l'essai normalisé

M_{bAp} = Masse dans l'air de la brique seule obtenue lors de l'essai par immersion d'échantillons paraffinés

D_B = Densité brute de la brique

Puisque la densité brute n'est pas connue (c'est la caractéristique recherchée), il faut supposer une valeur et si, à la fin de la procédure de calcul, la densité obtenue est différente de celle supposée, le calcul est repris en prenant la valeur calculée (calcul itératif). Puisque la densité est déjà estimée par l'essai BNQ 2300-040 et que la perte de matériau est faible entre les deux essais, un seul

calcul suffit généralement. La quantité d'eau absorbée est maintenant connue, cette valeur est ensuite additionnée à la masse dans l'air de la brique afin d'obtenir la masse SSS théorique.

$$M_{SSSt} = M_{AN} + M_{EA} \quad (4.8)$$

M_{SSSt} = Masse SSS théorique

Il reste à calculer la densité brute théorique en utilisant la formule usuelle et les résultats obtenus lors de l'essai normalisé, mais en substituant la masse SSS par la masse SSS théorique.

Chapitre 5. Caractérisation des matériaux utilisés pour l'étude: provenance et propriétés physiques

5.0 Introduction

Avant d'entreprendre la présentation des résultats relatifs à la caractérisation mécanique des matériaux recyclés stabilisés (chapitre 6), il importe de discuter de la provenance et des propriétés physiques des matériaux utilisés. C'est donc l'objet de ce chapitre. Le matériau recyclé employé pour l'étude en laboratoire provient du projet de réfection du boulevard Lemire à Drummondville. Un tel projet nécessite en premier lieu une investigation des matériaux présents sur le site. Le matériau issu de l'étape de pulvérisation doit être étudié afin d'établir sa granulométrie et sa teneur en bitume résiduel. Cette première étape a été réalisée par la firme Sintra et l'Université de Sherbrooke. Suite à cette caractérisation du matériau pulvérisé, la formulation, c.-à-d. l'identification du dosage optimal en eau et en liant d'ajout, a été effectuée. Cette étape a été réalisée conjointement par la firme Sintra et l'Université de Sherbrooke. Finalement, le contrôle en chantier du matériau pulvérisé stabilisé était sous la responsabilité des Laboratoires Shermont, et certains résultats de ce contrôle seront présentés dans cette section. L'influence qu'ont eue ces différentes étapes sur l'ensemble des études de laboratoire est non négligeable, car leurs résultats ont conditionné nos choix relatifs à la granulométrie et aux dosages du liant et de l'eau pour la fabrication en laboratoire des matériaux étudiés.

Ce chapitre s'intéresse également aux résultats de densité (masse volumique) et d'absorption à la saturation des briquettes testées. Finalement, une section discutera brièvement des émulsions (CSS-1 et Colfor) employées durant toute la période d'expérimentation en laboratoire.

5.1 Matériau pulvérisé et formulation

5.1.1 Le matériau issu de l'étape de pulvérisation

Afin de pouvoir étudier le matériau pulvérisé et aussi d'effectuer la formulation pour la stabilisation de celui-ci, neuf fenêtres (environ 3 m par 15 m chacune) ont été pulvérisées sur le boulevard Lemire. Cette étape a permis de vérifier les épaisseurs des couches de la chaussée sur l'ensemble de la longueur des travaux envisagés, ainsi que d'effectuer l'échantillonnage du matériau pulvérisé pour le caractériser (granulométrie et teneur en bitume résiduel) et pour compléter la formulation.

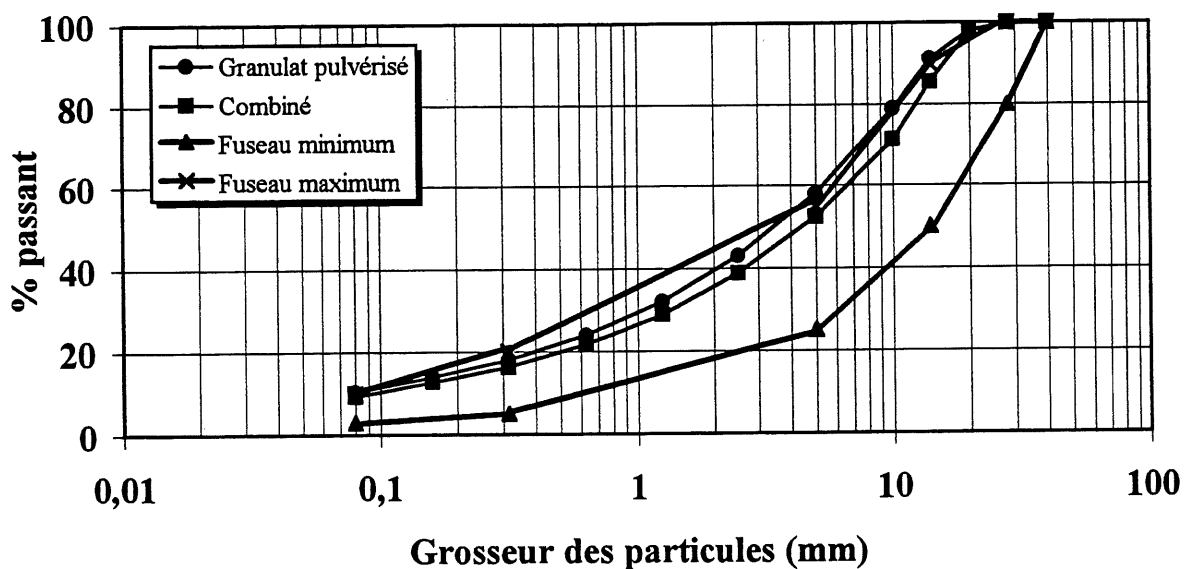
La firme Sintra a réalisé des granulométries sur le matériau prélevé sur cinq fenêtres, alors que l'Université de Sherbrooke a effectué une granulométrie pour chacune des neuf fenêtres afin de vérifier l'homogénéité (ou la variabilité) du matériau pulvérisé (qui a été jugée très satisfaisante). Le tableau 5.1 et le graphique 5.1 présentent la moyenne des granulométries obtenues (par la firme Sintra), la correction granulométrique effectuée ainsi que le fuseau prescrit par le Ministère des Transports du Québec pour les matériaux recyclés stabilisés. Le tableau 5.1 indique également la plage granulométrique obtenue afin que l'on puisse juger de la variabilité obtenue. Comme il est possible de le constater, le matériau pulvérisé nécessitait une correction afin d'ajuster sa courbe granulométrique à l'intérieur des limites du fuseau normalisé. Par conséquent, dix pour cent de pierre 5-20 mm ont été ajoutés pour fin de correction granulométrique.

La teneur en bitume du matériau pulvérisé a été déterminée pour cinq fenêtres par la firme Sintra. Les résultats variaient de 1,13 % à 1,68 % avec une moyenne de 1,42 %. Une fois la correction de pierre ajoutée, la teneur en bitume résiduel moyenne s'établissait à 1,28 %. C'est à partir de ces résultats que la formulation du matériau stabilisé a été effectuée. D'autres essais ont été réalisés en avant-projet (comme des granulométries après extraction), mais leur présentation dans le cadre de ce mémoire serait peu pertinente.

Tableau 5.1 Granulométrie et correction sur le granulat pulvérisé

Matériau	Pourcentage passant - tamis (mm)												%
	40	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,08	
Minimum	100	100	98	91	73	52	39	30	22	17	11	8	
Maximum	100	100	99	94	82	62	46	35	27	22	17	13	
G. pulvérisé (moy	100	100	98	91	79	58	43	32	24	18	14	10,3	90
Ajout (correction)	100	100	95	36	2	1	1	1	1	1	1	0,4	10
Combiné	100	100	98	86	71	52	39	29	22	16	13	9,3	100
Fuseau minimum	100	80		50		25				5		3	
Fuseau maximum	100	100		90		55				20		10	

Graphique 5.1 Courbes granulométriques du matériau pulvérisé et du combiné en fonction du fuseau du MTQ



5.1.2 Formulation

Il n'existe pas encore réellement de norme BNQ relative à la formulation des matériaux recyclés stabilisés. Néanmoins, une procédure de formulation a été expérimentée en 1994 et elle a été retenue par le Ministère des Transports du Québec [LOISEL, 1994]. C'est cette procédure qui a été employée au printemps 1995 pour établir la formulation du matériau stabilisé utilisé dans la réfection du boulevard Lemire. Le champ d'application de cette procédure se limite, pour l'instant, à une stabilisation à l'émulsion avec des matériaux recyclés. Dans le cas du boulevard Lemire, une stabilisation à l'aide d'un liant mixte bitume+ciment, le Stabicol, était prévue. La formulation a donc été effectuée en deux étapes, soit la réalisation de la procédure avec une émulsion de bitume conventionnelle et, ensuite, la vérification des paramètres obtenus avec le liant Stabicol.

La procédure de formulation vise essentiellement à déterminer trois paramètres: la teneur en eau de malaxage, la teneur en eau à la compaction et la teneur en liant d'ajout optimale. L'exercice a permis de recommander une teneur en eau à la compaction de 5% et une teneur en Stabicol d'ajout de 5%, c.-à-d. 3,5% de liant (bitume+ciment) d'ajout. La teneur en eau de malaxage n'a pas fait l'objet de recommandation, mais ce paramètre a été déterminé et utilisé lors de la formulation en laboratoire. Il est opportun de préciser que le liant Stabicol semble nécessiter beaucoup moins d'eau de malaxage qu'une émulsion CSS-1 pour obtenir un taux d'enrobage similaire. Le tableau 5.2 présente les caractéristiques établies lors de la formulation pour la teneur en liant d'ajout optimale (3,5%), et ce pour le liant Stabicol et l'émulsion CSS-1 (les valeurs pour le CSS-1 sont issues d'une interpolation entre 3,22% et 3,72% de bitume d'ajout).

**Tableau 5.2 Caractéristiques du matériau
stabilisé aux teneurs en eau et en liant
d'ajout optimales**

Caractéristiques	Stabicol	CSS-1
Densité brute du mélange	2,271	2,224
Densité maximale du mélange	2,532	2,511
% de vides dans le mélange	10,3	11,4
Stabilité Marshall témoin (kN)	21074	13572
Stabilité Marshall saturé (kN)	18873	8741
% de stabilité retenue	89,6	64,4
Déformation Marshall témoin	3,45	3,77

5.2 Contrôle en chantier

Le contrôle quantitatif et qualitatif des matériaux utilisés dans la réfection du boulevard Lemire était sous la responsabilité des Laboratoires Shermont. L'ensemble des résultats du suivi est présenté dans le document [MASCOLO, 1995]. L'objectif de cette section n'est pas de broser un tableau complet du contrôle effectué pour les étapes de pulvérisation et de stabilisation du boulevard Lemire, mais plutôt de souligner les différences entre les matériaux (granulat et matériau stabilisé) utilisés en étude d'avant-projet et ceux obtenus en chantier. Plus spécifiquement, cette section se penchera sur les résultats et les méthodes de contrôle reliés à la granulométrie et la teneur en bitume du matériau pulvérisé, ainsi que sur le taux d'épandage du liant lors de l'étape de stabilisation.

5.2.1 Étape de la pulvérisation

Il avait préalablement été décidé de pulvériser la chaussée sur 200 mm afin d'éviter la couche de pierre de classification 0-56 mm. Le projet de réfection était divisé en trois lots, et cinq échantillons par lot devaient être prélevés pour le contrôle de la granulométrie et du bitume

résiduel. L'échantillonnage était réalisé conjointement par Sintra, les Laboratoires Shermont et l'Université de Sherbrooke. Les granulométries officielles sont celles obtenues par les Laboratoires Shermont, celles réalisées à l'Université de Sherbrooke faisant état de résultats pratiquement identiques. Le tableau 5.3 présente la moyenne des résultats des granulométries avant extraction ainsi que la teneur en bitume obtenue pour chaque lot.

Tableau 5.3 Granulométries et teneurs en bitume du matériau pulvérisé

Lot	Pourcentage passant - tamis (mm)											Teneur en bitume (%)
	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,08	
1	97	92	77	64	46	35	28	20	15	12	9,2	0,77
2	98	95	82	68	50	39	30	23	18	14	11,3	0,69
3	97	92	78	64	45	35	27	21	16	12	9,8	1,05
Moyenne	97	93	79	65	47	36	28	21	16	13	10,1	0,84
Fuseau minimum	80		50		25				5		3	
Fuseau maximum	100		90		55				20		10	

Il faut également ajouter qu'environ 4% de la masse était retenue sur le tamis 40 mm, car les granulométries présentées ont été effectuées sur le passant 40 mm (la majeure partie de cette masse retenue sur le 40 mm est constituée de blocs de béton bitumineux). Le technicien responsable en chantier a noté que le décohésionnement a été mieux réussi à cet égard pour les lots 2 et 3. On peut remarquer des différences significatives entre ces résultats et le matériau utilisé en étude d'avant-projet, notamment sur le pourcentage de bitume résiduel du matériau pulvérisé. On note finalement que le fuseau granulométrique est relativement bien respecté.

5.2.2 Étape de la stabilisation

Le liant Stabicol était fabriqué, sur un site situé à proximité, au fur et à mesure que la stabilisation s'effectuait. Le transport du liant se faisait par citerne. Avec la présence de ciment, il devenait impossible d'établir, sans risque d'erreur, la teneur en liant du matériau stabilisé à l'aide de l'essai d'extraction de bitume habituellement employé avec une stabilisation à l'émulsion. Pour établir le taux de pose, on calculait la superficie couverte pour chaque citerne utilisée.

Cette méthode permettait, avec une précision relative, d'obtenir le nombre de litres ou de kilogrammes de liant utilisés par mètre carré de surface stabilisée. L'épaisseur d'intervention était supposée constante à 125 mm. Puisqu'un ajout de 5% en Stabicol (3,5% en liant d'ajout) était prévu, et en supposant une masse volumique sèche finale de 2271 kg/m^3 , un dosage de $14,2 \text{ kg/m}^2$ de Stabicol devait être visé. Selon le calcul établi par les Laboratoires Shermont, il y a eu en moyenne $14,65 \text{ kg/m}^2$ de Stabicol épandu, les résultats affichent un écart-type de $0,99 \text{ kg/m}^2$, et les valeurs extrêmes sont $10,94 \text{ kg/m}^2$ et $18,02 \text{ kg/m}^2$. Si on émet l'hypothèse que l'épaisseur d'intervention a été bien contrôlée, on arrive à un ajout de Stabicol d'environ 5,15% (ou 3,6% de liant d'ajout).

5.3 Reconstitution et fabrication des matériaux étudiés

Ce sous-chapitre discute du choix des paramètres relatifs à la fabrication en laboratoire des matériaux stabilisés tels la granulométrie retenue, le dosage en liant d'ajout, la teneur en eau à la compaction, la teneur en eau prémix (de malaxage), etc. Il présente, en premier lieu, les méthodes de prélèvement, d'entreposage et de reconstitution du granulat utilisées en laboratoire.

5.3.1 Prélèvement et reconstitution du matériau pulvérisé

Le matériau devant servir à la fabrication des éprouvettes en laboratoire a été prélevé lors de la prise d'échantillons conjointe après la pulvérisation sur le chantier (réalisée pour le contrôle de la granulométrie et de la teneur en bitume résiduel). Le matériau pulvérisé a été prélevé à différents endroits sur le chantier et emmagasiné dans cinq barils. Environ 2000 kilogrammes de matériau pulvérisé furent ainsi recueillis.

Sans constituer une source d'erreur importante, cette méthode de prélèvement et d'emmagasinage n'était pas idéale. En effet, le matériau pulvérisé a démontré certaines variations dans sa granulométrie et sa teneur en bitume résiduel selon son emplacement sur le chantier. Par conséquent, il pouvait y avoir de légères différences dans la composition du matériau contenu dans chacun des barils. Malgré cette source d'erreur potentielle, la méthode de reconstitution granulométrique employée pour la fabrication de chacune des éprouvettes testées en laboratoire nous permet de croire que l'influence réelle de ce facteur n'est pas significative.

En effet, le matériau contenu dans les barils était d'abord séché à 60°C pendant 24 heures pour ensuite être séparé sur les tamis 28, 20, 14, 10, 5 mm et passant 5 mm. Le matériau retenu sur le tamis 28 mm était éliminé, alors que le contenu des autres tamis était conservé séparément dans des sacs. Par la suite, chaque masse de granulat nécessaire à la fabrication d'une éprouvette (soit une brique Marshall, un essai CBR ou autres) était reconstituée selon une granulométrie basée sur le passant 28 mm (combiné obtenu à l'Université de Sherbrooke). Le tableau 5.4 présente les proportions employées pour cette reconstitution granulométrique.

Tableau 5.4 Reconstitution granulométrique

Tamis (mm)		Pourcentage
Passant	Retenu	%
28	20	3
20	14	14
14	10	12
10	5	19
5		52
	Total	100

5.3.2 Formulation à l'Université de Sherbrooke

À la fois pour vérifier les résultats de la formulation réalisée au printemps 1995 avec l'équipe de laboratoire de la firme Sintra, et aussi pour se familiariser avec l'équipement de l'Université de Sherbrooke, la procédure de formulation fut effectuée sur le matériau prélevé en chantier (avec l'émulsion CSS-1 seulement). Les tableaux et graphiques issus de cet exercice sont présentés en annexe à la section correspondante. Voici les conclusions de cet exercice:

- Teneur en eau prémix: 6,0 %.
- Teneur en eau à la compaction: 5,5%.
- Teneur en liant d'ajout optimale: 3,5%.

Ces résultats sont très semblables à ceux obtenus lors de la formulation du printemps 1995. On note une petite différence concernant la teneur en eau à la compaction (5,5% versus 5%). De plus, la teneur en eau prémix est relativement élevée et il est permis de croire qu'une teneur en eau prémix moins élevée aurait pu être utilisée si l'énergie de malaxage avait été augmentée.

5.3.3 Choix des teneurs en liant et en eau

Avant d'entreprendre véritablement l'étude en laboratoire, il importait de choisir les teneurs en liant, en eau à la compaction et en eau prémix qui seraient utilisées pour l'ensemble des essais à réaliser. Une teneur en eau prémix de 6% ayant été déterminée avec les instruments et la méthode de malaxage employés à l'Université de Sherbrooke, cette valeur a été conservée pour l'ensemble de l'étude (sauf pour les essais CBR, voir section 4.3.5).

Pour le choix de la teneur en eau à la compaction, deux valeurs avaient été préalablement déterminées (5% et 5,5%). Puisque la teneur en eau prémix était relativement élevée et que nous désirions diminuer autant que possible le temps de séchage, entre le malaxage et la compaction, la teneur en eau à la compaction la plus élevée a été conservée (5,5%). Il faut souligner qu'avec une teneur en eau prémix de 6% et un dosage en liant d'ajout d'environ 3,5%, la teneur en eau réelle après malaxage est approximativement de 7,5%. Par conséquent, le temps de séchage (pour obtenir la teneur en eau à la compaction désirée) à l'air libre (ventilateur) s'avère relativement long.

Finalement, il a été décidé d'utiliser le dosage en liant d'ajout moyen en chantier (3,6%), ceci afin de pouvoir le mieux possible, dans le futur, comparer le comportement en chantier et les résultats de laboratoire.

5.4 Propriétés physiques des matériaux étudiés

Cette section s'intéresse aux résultats relatifs à la caractérisation physique obtenus avec les éprouvettes utilisées lors des essais Brésilien, compression simple et Marshall (cure normalisée). Ces trois essais utilisaient la briquette Marshall comme échantillon. La fabrication des briquettes Marshall s'effectuait selon quatre modes de compaction. Ces modes de compaction étaient 10, 30, 50 et 60 coups de marteau par face de briquette. En tout, six briquettes étaient fabriquées pour chaque mode de compaction, trois étaient testées "témoin" et les trois autres étaient testées après saturation. Une teneur en eau était réalisée sur chaque briquette saturée après l'essai; connaissant

la teneur en eau après curage (voir section 7.3), il était alors possible de calculer le pourcentage d'absorption lors de la saturation. La densité des briquettes témoins était déterminée avant la réalisation des essais destructifs.

5.4.1 Masse volumique sèche en fonction de la procédure de compaction

Le tableau 5.5 présente les résultats moyens de la masse volumique sèche obtenus pour chaque essai (compression simple, Brésilien, Marshall cure normalisée) en fonction de chaque procédure de compaction. Les résultats complets (comprenant les résultats des essais Marshall pour différentes périodes de cure également) sont présentés en annexe à la section correspondante. Pour obtenir le résultat de la masse volumique sèche, l'essai BNQ 2300-040 est effectué afin d'obtenir la densité brute de la briquette, puis à partir de ce résultat on calcule la densité brute sèche avec la formule suivante:

$$D_{BS} = \frac{D_B \times (100 + B)}{(100 + B + W_c)} \quad (5.2)$$

D_{BS} = densité brute sèche

D_B = densité brute

W_c = teneur en eau (après curage dans notre cas) correspondante (voir section 5.5.1)

B = teneur en bitume totale

Cette formule provient de la procédure de formulation [LOISEL, 1994]. La teneur en bitume totale correspond à la somme du bitume résiduel contenu dans le granulat et du bitume ajouté par l'apport d'émulsion. La teneur en bitume résiduel contenu dans le granulat a été arrondie à 0,9% (valeur dérivée du contrôle effectué par les Laboratoires Shermont, voir tableau 5.3). Notons finalement que pour le calcul de la densité brute sèche avec le matériau stabilisé au Stabicol, nous avons utilisé le concept de liant total, c.-à-d. bitume résiduel du granulat + bitume dans le Stabicol + ciment dans le Stabicol.

La masse volumique sèche moyenne reliée à la procédure de compaction 50 coups/face désigne la masse volumique maximale ou celle équivalant à 100% de compaction. Par conséquent, lorsque l'on fera référence à un pourcentage de compaction dans la présentation des résultats, ce pourcentage sera calculé en fonction des valeurs de la masse volumique sèche présentées dans ce tableau, c.-à-d. 2242 kg/m³ pour le matériau stabilisé au CSS-1 et 2293 kg/m³ pour celui stabilisé au Stabicol.

Tableau 5.5 Masses volumiques sèches obtenues en fonction de la procédure de compaction et du liant utilisé

Liant	Procédure de compaction	Essai-masse volumique sèche (g/cm ³)			Moyenne
		compression	Brésilien	Marshall	
CSS-1					
	10 cps/face	2,124	2,110	2,122	2,119
	30 cps/face	2,215	2,211	2,219	2,215
	50 cps/face	2,246	2,237	2,242	2,242
	60 cps/face	2,251	2,245	2,258	2,251
Stabicol					
	10 cps/face	2,140	2,132	2,136	2,136
	30 cps/face	2,261	2,248	2,261	2,257
	50 cps/face	2,290	2,287	2,301	2,293
	60 cps/face	2,295	2,290	2,296	2,294

5.4.2 Absorption d'eau pendant la saturation

L'absorption d'eau à la saturation est un des facteurs considérés dans la procédure de formulation pour la détermination du pourcentage de liant d'ajout optimal. Dans le contexte de notre étude, l'absorption d'eau n'est pas un paramètre très important puisque le pourcentage de liant est toujours le même. Néanmoins, le niveau de compaction du matériau influence également le pourcentage d'absorption. Un matériau faiblement densifié pourra absorber plus d'eau qu'un matériau hautement densifié, car sa perméabilité et sa porosité sont supérieures. Le tableau 5.6 présente la moyenne des pourcentages d'absorption d'eau à la saturation obtenus pour chaque essai (Brésilien, compression simple et Marshall cure normalisée) en fonction de la procédure de compaction utilisée, et ce, pour les deux matériaux étudiés. Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

L'absorption d'eau est calculée comme suit:

$$A_{\%} = W_{MT} - W_{MS} \quad (5.3)$$

$A_{\%}$ = absorption d'eau à la saturation en %

W_{MT} = teneur en eau moyenne des échantillons testés témoins (teneur en eau après curage)

W_{MS} = teneur en eau des échantillons testés saturés

La teneur en eau après saturation correspond à la teneur en eau après essai (la masse humide était obtenue après l'essai). Durant les essais, une partie de l'eau des échantillons saturés était expulsée. Cette expulsion est fonction de la déformation de l'échantillon durant l'essai et de la perméabilité du matériau testé. Par conséquent, la teneur en eau après saturation est légèrement faussée et le résultat de l'absorption également. Dans ces conditions, il est difficile de comparer les résultats entre les deux matériaux étudiés, car la quantité d'eau expulsée peut différer d'un matériau à l'autre et en fonction des essais. Une étude sur la teneur en eau après saturation aurait pu être menée, mais cette étude nous semblait peu pertinente en raison de la faible importance de ce paramètre dans l'ensemble de notre étude.

Notons que l'écart entre les deux matériaux est faible, que l'écart entre les différents essais est également peu élevé et que l'absorption est grandement influencée par le niveau de compaction des briquettes.

Tableau 5.6 Absorption d'eau à la saturation en fonction de la procédure de compaction et du liant utilisé

Liant	Procédure de compaction	Essai-absorption d'eau à la saturation			Moyenne
		compression	Brésilien	Marshall	
CSS-1					
	10 cps/face	8,01%	7,81%	7,81%	7,88%
	30 cps/face	5,76%	5,54%	5,54%	5,62%
	50 cps/face	5,36%	5,00%	5,20%	5,19%
	60 cps/face	5,00%	5,06%	4,85%	4,97%
Stabicol					
	10 cps/face	8,26%	7,42%	8,13%	7,94%
	30 cps/face	5,40%	5,21%	5,30%	5,30%
	50 cps/face	4,65%	4,34%	4,59%	4,53%
	60 cps/face	4,16%	4,04%	4,49%	4,23%

5.5 Les émulsions: CSS-1 et Colfor

Les émulsions nous étaient fournies par la firme Sintra. On les en remercie. Ces émulsions étaient confectionnées au laboratoire S.T.E.B. Div. de Sintra Inc. à St-Hyacinthe et étaient par la suite acheminées à l'Université de Sherbrooke. Les émulsions de bitume ne sont pas des mélanges stables, c.-à-d. que leur durée de vie est limitée. L'émulsion CSS-1 conserve de bonnes propriétés

pendant deux à trois mois, alors que le Colfor (émulsion nécessaire à la fabrication du liant Stabicol) demeure dans une bonne condition durant trois à quatre semaines. En tout, six lots d'émulsion CSS-1 et cinq lots de Colfor ont été utilisés pour la réalisation des études en laboratoire. L'utilisation des émulsions s'est faite sans distinction du lot utilisé, c.-à-d. que nous avons considéré que les propriétés des matériaux stabilisés n'étaient pas affectées par le lot d'émulsion utilisé. Ceci n'est, bien sûr, pas rigoureusement vrai, mais la différence de comportement provoquée par l'utilisation de deux lots distinctifs est somme toute minime comparée à celle observée entre le Stabicol et le CSS-1. Il faut également souligner que tous les échantillons pour un même essai ont toujours été fabriqués avec un même lot d'émulsion. Les briquettes Marshall cure normalisée + 6 jours de cure 2^{ème} lot CSS-1 ont cependant été confectionnées avec un lot différent des briquettes Marshall cure normalisée + 2, 6 (1^{er} lot) et 27 jours de cure.

Chapitre 6. Essais de caractérisation mécanique

6.0 Introduction

Le présent chapitre traite des résultats obtenus lors des différentes expérimentations menées en laboratoire avec le matériau pulvérisé issu du chantier du boulevard Lemire à Drummondville. Le travail de recherche effectué comprend les essais imposés dans le cadre du protocole de recherche avec la ville de Drummondville ainsi qu'une étude complémentaire de gel-dégel. Tous les essais effectués ont été réalisés sur deux matériaux recyclés stabilisés, c.-à-d. un matériau stabilisé à l'aide d'une émulsion de bitume conventionnelle CSS-1 et un autre matériau stabilisé à l'aide d'une émulsion mixte bitume+ciment nommée Stabicol. Le même granulat, issu de la pulvérisation du boulevard Lemire à l'été 1995, a été utilisé pour la confection des deux matériaux.

Le protocole de recherche demandait d'effectuer des essais Marshall, Brésilien, compression simple et CBR sur les matériaux étudiés en variant la densité de ceux-ci. Les essais Marshall, Brésilien et de compression simple ont été réalisés sur des briquettes Marshall ayant subi une cure normalisée (24 heures à 38°C), alors que l'essai CBR a été effectué avec des échantillons compactés et curés selon des procédures particulières (voir section 4.3.5). De plus, le protocole demandait d'effectuer une étude sur la variation de la stabilité Marshall en fonction du temps de cure (sous des conditions particulières, voir section 4.3.2).

6.1 Essai Marshall: cure normalisée

6.1.1 Objet et contexte d'étude

Même si l'essai Marshall est souvent critiqué en raison des dimensions restreintes de ses échantillons testés et de son mode de compression diamétrale utilisé, il n'en demeure pas moins, pour l'instant, une des références les plus importantes dans le milieu des bétons bitumineux et, maintenant, dans le cadre des matériaux recyclés stabilisés. La procédure de formulation de ces matériaux, retenue au Québec [LOISEL, 1994], est d'ailleurs basée en grande partie sur cet essai. L'expérience a démontré que l'on obtient des résultats cohérents avec ce type d'essai, même si l'ensemble des intervenants n'est pas unanime sur l'importance à accorder à ceux-ci dans la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés.

Dans le présent contexte d'étude, les résultats obtenus à l'essai de stabilité Marshall seront une des références principales, tant pour la caractérisation des matériaux étudiés que pour l'évaluation du potentiel des autres essais effectués. Comme pour la majorité des expérimentations menées, l'essai Marshall a été réalisé sur des briquettes fabriquées à partir des deux matériaux étudiés (stabilisation au CSS-1 et au Stabicol) dans des conditions témoin et après saturation. Quatre procédures de compaction ont été utilisées lors de la fabrication des briquettes générant ainsi une variation de densité. Il est donc possible d'analyser de façon comparative les résultats des essais témoins et après saturation pour les matériaux stabilisés au CSS-1 et au Stabicol, le tout en fonction du pourcentage de compaction.

6.1.2 Présentation et analyse des résultats

Le tableau 6.1 présente les résultats moyens de stabilité obtenus à l'essai Marshall pour les deux matériaux étudiés et pour les deux conditions d'essai (témoin et après saturation). Le pourcentage de compaction est calculé par rapport à la valeur moyenne pour l'ensemble des essais de densité brute sèche pour la procédure de compaction normalisée (50 coups/face) respective des deux matériaux (pour plus d'informations à ce sujet voir section 5.4.1). La masse volumique sèche a été

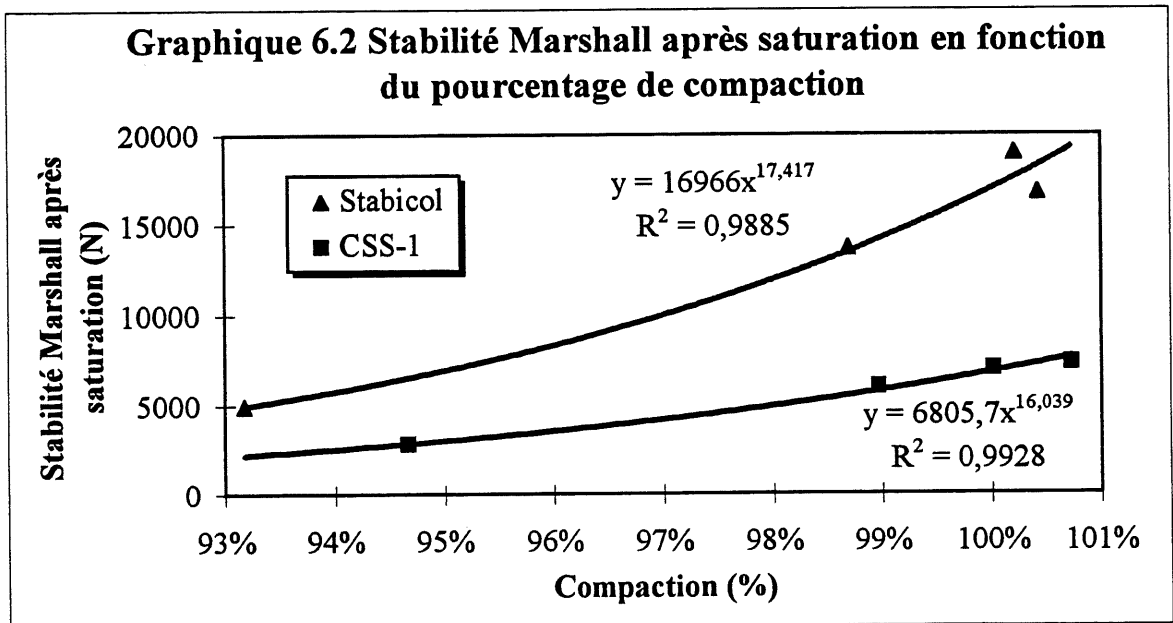
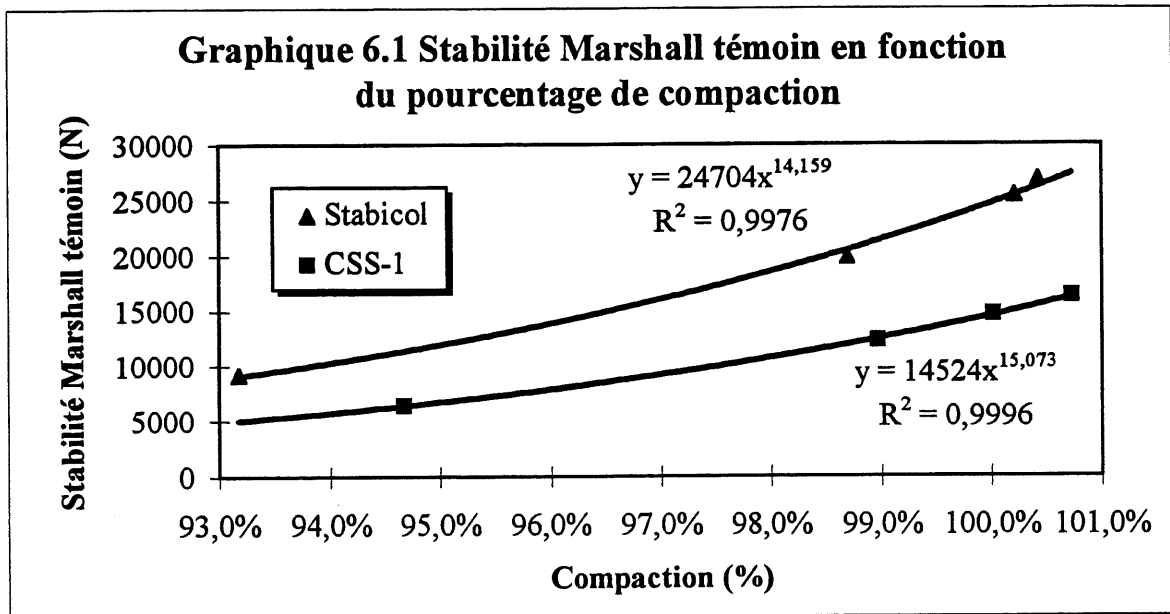
déterminée pour les trois briquettes testées témoins et la moyenne de ces résultats pour cet essai est utilisée pour le calcul du pourcentage de compaction. La colonne "Déformation moyenne témoin" représente la moyenne des déformations Marshall à la rupture pour les trois briquettes testées témoins. L'ensemble des résultats est présenté en annexe à la section correspondante.

**Tableau 6.1 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall
en fonction du liant et du pourcentage de compaction
pour une cure normalisée**

Liant	Procédure de compaction	Pourcentage de compaction	Stabilité moyenne témoin (N)	Stabilité moyenne saturée (N)	Perte à saturation (%)	Déformation moyenne témoin (mm)
CSS-1						
	10 cps/face	94,7%	6377	2788	56,3%	3,50
	30 cps/face	99,0%	12270	5989	51,2%	4,13
	50 cps/face	100,0%	14633	6974	52,3%	3,63
	60 cps/face	100,7%	16282	7298	55,2%	3,54
Stabicol						
	10 cps/face	93,2%	9144	4921	46,2%	1,71
	30 cps/face	98,7%	19841	13701	30,9%	2,25
	50 cps/face	100,4%	26901	16769	37,7%	2,42
	60 cps/face	100,2%	25424	18958	25,4%	2,75

Nous remarquons en premier lieu que la plage de densité est un peu plus importante pour le matériau stabilisé au Stabicol que pour celui stabilisé au CSS-1. La majeure partie de cette différence provient du faible pourcentage de compaction obtenu avec la procédure 10 coups/face. Ceci s'explique aisément par le fait que le matériau stabilisé au Stabicol avait tendance à commencer à se solidifier pendant la période de séchage avant la compaction. Une partie de l'énergie de compaction des premiers coups de marteau devait alors être utilisée pour briser ces liens et non entièrement pour densifier le matériau. Cette caractéristique se retrouvera dans les

résultats des études subséquentes utilisant ce type d'échantillon (briquelette Marshall) et la même procédure de compaction.



Les graphiques 6.1 et 6.2 présentent les résultats moyens de la stabilité Marshall, témoin et après saturation respectivement, en fonction du pourcentage de compaction pour les deux matériaux étudiés. Un lissage de type " ax^b " a été effectué nous permettant d'estimer la stabilité pour n'importe quel pourcentage (dans la plage de densités présentée) de compaction. On note que les

régressions utilisées semblent très représentatives des résultats obtenus, car les coefficients de détermination R^2 sont très élevés. Il est ainsi possible de comparer la stabilité respective des deux matériaux pour un même pourcentage de compaction. À l'aide des équations des courbes de lissage, il est facile de calculer la stabilité Marshall témoin et après saturation pour 100% de compaction ($x=1$). Pour ce cas, les stabilités témoin et après saturation pour le matériau stabilisé au Stabicol (24704 N et 16966 N) équivalent respectivement à 170% et 249% de celles obtenues pour celui stabilisé au CSS-1 (14524 N et 6806 N). Selon les équations obtenues, on peut noter qu'un matériau stabilisé au Stabicol compacté à 96,3% obtiendra une stabilité Marshall témoin similaire au matériau stabilisé au CSS-1 compacté à 100%.

Il est bon de souligner que la saturation obtenue était très sévère dans notre cas, car la pompe à vide permettait de faire un vide partiel (environ 12 mm à 16 mm de Hg) beaucoup plus important que le vide partiel minimum (100 mm de Hg) demandé dans la procédure de formulation. Cependant pour un même vide, le matériau stabilisé au Stabicol a obtenu des pertes à la saturation nettement inférieures à celles observées avec celui stabilisé au CSS-1. En effet, même si les résultats du tableau 6.1 ne présentent pas de tendance en fonction du niveau de compaction des matériaux, les pertes à la saturation sont de l'ordre de 30 à 35% (sauf pour un faible pourcentage de compaction) pour le matériau stabilisé au Stabicol alors qu'elles sont environ de 50 à 55% pour le matériau stabilisé au CSS-1.

La déformation moyenne à la rupture pour les échantillons témoins est sensiblement plus élevée avec le matériau stabilisé au CSS-1 que celui stabilisé au Stabicol. Plus spécifiquement, pour la procédure de compaction normale (50 coups/face), la déformation moyenne à la rupture est exactement 1,5 fois plus élevée pour le matériau stabilisé au CSS-1 que celle obtenue avec le Stabicol. La déformation à la rupture se veut un indice de la flexibilité d'un matériau. Le paramètre de la déformation à la rupture est influencé par plusieurs facteurs: l'opérateur, le pourcentage de liant (ou de bitume), le granulats, etc. Dans notre cas, l'ensemble de ces facteurs ne variait pas entre les deux matériaux étudiés. Il est donc possible d'affirmer que le matériau stabilisé au Stabicol est moins ductile ou flexible que celui stabilisé au CSS-1. Ceci ne constitue pas une surprise; le Stabicol se veut un compromis acceptable entre la flexibilité des liants hydrocarbonés et la résistance mécanique accrue des liants hydrauliques. La déformation à la rupture obtenue

avec le Stabicol (environ 2,5 mm) semble à première vue acceptable, mais il manque une base de comparaison solide pour pouvoir affirmer que le Stabicol offre une bonne flexibilité.

6.1.3 Analyse statistique des résultats

Les analyses des résultats étant strictement basées sur les valeurs moyennes, il est difficile dans ces conditions pour le lecteur d'apprécier la précision et la variation des résultats obtenus. C'est pourquoi une courte analyse statistique sera généralement présentée pour chaque essai effectué. Cette analyse indiquera la moyenne, l'écart-type, l'intervalle de confiance sur la moyenne et le pourcentage d'erreur potentiel maximal pour chaque groupe de résultats, c.-à-d. pour chaque procédure de compaction, état (témoin ou saturé) des briquettes à l'essai et liant utilisé. La taille des échantillons statistiques est toujours (à quelques exceptions près) de trois résultats. Les intervalles de confiance, sauf avis contraire, sont calculés en fonction de 90% de certitude, et le pourcentage d'erreur potentiel maximal décrit simplement la valeur du demi intervalle calculé divisé par la moyenne correspondante.

Le tableau 6.2 présente ces résultats pour les essais Marshall avec une cure normalisée. Comme il est possible de le remarquer, le pourcentage d'erreur potentiel maximal sur la moyenne est généralement en dessous de 10%, ce qui est très satisfaisant pour des populations de taille aussi petite (trois résultats). On ne remarque pas de différences appréciables de précision entre les deux matériaux étudiés.

En réalité cependant, les résultats des essais sont analysés en fonction d'une valeur moyenne de stabilité et une valeur moyenne du pourcentage de compaction. En conséquence, le pourcentage d'erreur potentiel maximal global (faisant intervenir les deux variables) peut différer légèrement (à la hausse ou à la baisse selon le cas) de celui présenté. Cependant, cette analyse statistique se veut un indicateur simple de la précision obtenue et n'a pas la prétention de déterminer exactement l'erreur expérimentale.

**Tableau 6.2 Analyse statistique des résultats Marshall
cure normalisée**

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (N)	Écart-type (N)	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1						
	10 cps/face	Témoin	6377	899	±854	13,4%
		Saturé	2788	412	±391	14,0%
	30 cps/face	Témoin	12270	1289	±1224	10,0%
		Saturé	5989	230	±219	3,7%
	50 cps/face	Témoin	14633	405	±471	3,2%
		Saturé	6974	954	±906	13,0%
Stabicol						
	10 cps/face	Témoin	9144	626	±595	6,5%
		Saturé	4921	275	±261	5,3%
	30 cps/face	Témoin	19841	329	±313	1,6%
		Saturé	13701	549	±521	3,8%
	50 cps/face	Témoin	26901	2323	±2206	8,2%
		Saturé	16769	423	±402	2,4%
	60 cps/face	Témoin	25424	3492	3317	13,0%
		Saturé	18958	1148	1090	5,7%

Notons finalement que l'erreur expérimentale sur les courbes de régression peut être très différente de la valeur moyenne des pourcentages d'erreur potentiels maximaux présentés dans les tableaux d'analyse statistique. En effet, la précision des courbes de régression dépend à la fois de la précision des points expérimentaux et de la qualité du modèle mathématique choisi pour estimer ces points. En l'occurrence, il serait possible qu'une infinité d'essais (erreur sur la moyenne nulle) résulte en des points expérimentaux impossibles à lisser convenablement, par une équation

mathématique commune, et tenter de le faire résulterait en des erreurs appréciables d'estimation. Pour juger de la précision des régressions, le lecteur pourra se référer aux coefficients de détermination R^2 présentés sur les graphiques correspondants.

6.2 Étude de stabilité Marshall en fonction du temps de curage

6.2.1 Objet et contexte d'étude

Le phénomène d'augmentation de portance et de résistance des matériaux stabilisés en fonction de la cure est connu depuis longtemps. Le temps et l'évaporation (réduction de la teneur en eau) sont deux des principaux facteurs qui influencent le gain de résistance des matériaux stabilisés à l'émulsion de bitume. On suppose aussi que ces deux facteurs influencent la résistance des matériaux stabilisés à l'aide des liants mixtes bitume+ciment, tel le Stabicol. Il est souvent difficile de dissocier ces deux facteurs d'influence, puisque l'évaporation s'effectue en partie en fonction du temps.

Dans le contexte du chantier, il est probable que l'évaporation participe activement à l'augmentation du niveau de portance du matériau recyclé stabilisé avant l'étape de recouvrement par le pavage. En laboratoire, cette période est simulée (et accélérée) par la cure normalisée des briquettes à l'étuve. La teneur en eau diminue alors à moins de 1 pour-cent (pour le matériau stabilisé au CSS-1) (voir section 7.3). Il serait surprenant, mais non impossible, qu'en chantier une telle teneur en eau avant recouvrement se vérifie sur la pleine épaisseur du matériau stabilisé. En laboratoire, la cure se termine normalement à ce moment-là et les briquettes sont alors testées.

En chantier cependant, la cure se poursuit. Le taux d'augmentation de portance est toutefois diminué, mais cette période de gain peut s'échelonner sur plusieurs mois [AMIRI, 1994] [WIJK VAN, 1984]. Pendant ce temps, la teneur en eau peut encore diminuer, elle peut également augmenter ou demeurer relativement la même. Son influence durant cette période est malheureusement peu étudiée et documentée. Dans ce contexte, plusieurs questions peuvent être soulevées sur la validité des études en laboratoire menées essentiellement en fonction d'une évaporation forte et à court terme. En effet, les conclusions de nos études seraient-elles

différentes si on permettait au matériau recyclé stabilisé une période de cure de plusieurs semaines, voir plusieurs mois? Le gain (%) de stabilité Marshall observé avec le matériau stabilisé au Stabicol comparativement à celui stabilisé au CSS-1 demeurerait-il inchangé? C'est dans le but d'apporter un peu de lumière sur ces questions et aussi pour étudier l'influence du temps dans le processus de curage des matériaux recyclés stabilisés que cette expérimentation fut menée.

Le lecteur soucieux de prendre en compte l'ensemble de la procédure relative à cette expérimentation pourra se référer à la section 4.3.2. Rappelons cependant que tous les échantillons testés dans cette étude ont d'abord subi une cure normalisée (24 heures à 38°C). Par la suite, ils ont été enveloppés sous pellicule plastique afin d'éviter toute évaporation ou apport d'humidité dans le temps. Ils ont finalement été entreposés dans cet état à l'intérieur d'une chambre à température et humidité contrôlées pour différents temps avant d'être testés. Des briquettes stabilisées au CSS-1 ont bénéficié des cures suivantes: cure normalisée (résultats de la section 6.1), cure normalisée plus 2 jours, cure normalisée plus 6 jours (2 lots) et cure normalisée plus 27 jours. Des briquettes stabilisées au Stabicol ont été exposées aux mêmes types de cure et, en plus, un lot a bénéficié d'une cure normalisée plus 4 jours.

6.2.2 Présentation et analyse des résultats

Les tableaux qui suivent présentent les résultats moyens pour chacun des types de cure utilisés. Ces tableaux sont accompagnés par des graphiques de la stabilité Marshall (témoin et après saturation moyenne) en fonction du pourcentage de compaction pour chacun des temps de cure et matériaux étudiés. Les équations des lissages de type " ax^b " sont montrées sur les graphiques respectifs, ainsi que les coefficients de détermination R^2 . Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante. Les résultats relatifs au type de cure normalisée sont naturellement ceux exposés dans la section 6.1.

On note que les déformations à la rupture ne sont pas disponibles pour les briquettes 50 et 60 coups/face stabilisées au Stabicol avec les types de cure: cure normalisée + 2 jours, cure normalisée + 6 jours et cure normalisée + 27 jours. Le montage lors de ces essais ne nous permettait pas d'obtenir ce paramètre. Pour plus d'information à ce sujet, voir les sections 4.3.2 et 7.5. Au sujet de la déformation à la rupture, on observe une tendance légèrement à la hausse (passant de $\approx 3,5$ mm à $\approx 4,25$ mm) en fonction du temps pour le matériau stabilisé au CSS-1, alors que les données disponibles avec le matériau stabilisé au Stabicol ne semblent pas démontrer de relation ni à la hausse ni à la baisse.

Les pertes de stabilité à la saturation pour le matériau stabilisé au CSS-1 ne semblent pas démontrer de relation en fonction du pourcentage de compaction. Toujours pour le matériau stabilisé au CSS-1, on observe une diminution du pourcentage de perte à la saturation après un certain laps de temps de curage pour atteindre une valeur approximative de 45%. Pour le matériau stabilisé au Stabicol, la perte à la saturation suit des tendances différentes selon le niveau de compaction des échantillons. D'une part, pour les briquettes faiblement densifiées (10 coups/face), la perte à la saturation suit une tendance à la baisse en fonction du temps de curage supplémentaire, passant de 46,2% pour une cure normalisée à 23,8% pour une cure normalisée +27 jours. Pour les échantillons plus fortement densifiés (30, 50 et 60 coups/face), la perte à la saturation ne semble pas suivre une tendance prononcée, se contentant de fluctuer autour de 35%.

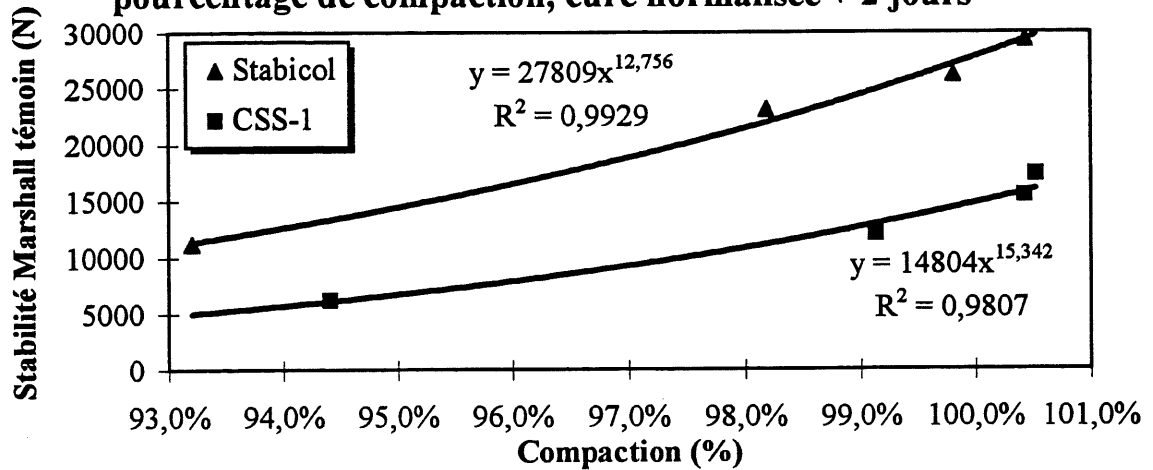
Un des comportements observés lors d'une formulation est la tendance de la perte à saturation en fonction du pourcentage de liant d'ajout. Avec les liants hydrocarbonés (émulsion de bitume, bitume moussé), on observe pratiquement toujours une baisse de ce paramètre en fonction du pourcentage de liant ajouté. Cependant, avec une stabilisation à l'aide d'un liant mixte il y a rarement une tendance précise observée à cet égard, mais la perte à saturation est généralement moindre que celle obtenue avec un liant hydrocarboné.

**Tableau 6.3 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall
en fonction du liant et du pourcentage de compaction
pour une cure normalisée + 2 jours**

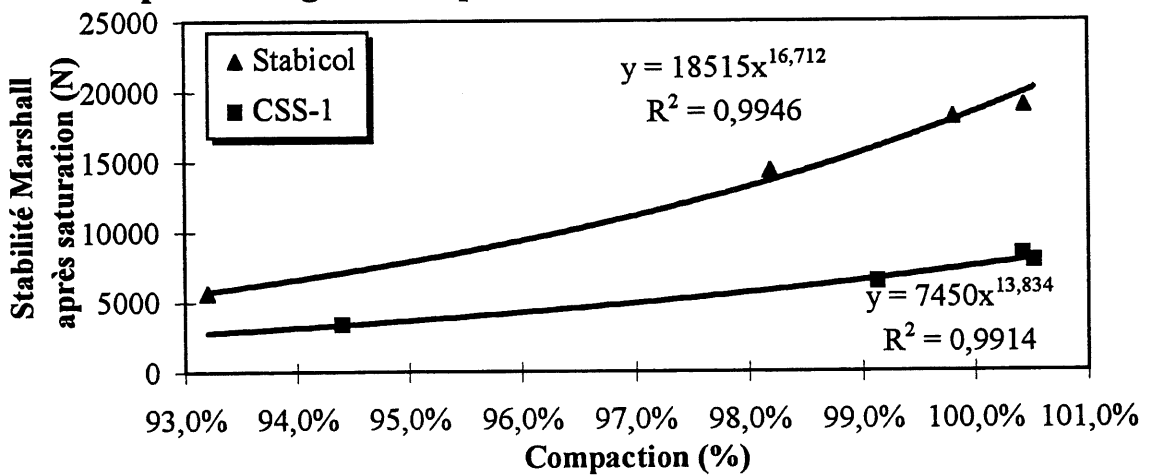
Liant	Procédure de compaction	Pourcentage de compaction	Stabilité moyenne témoin (N)	Stabilité moyenne saturée (N)	Perte à saturation (%)	Déformation moyenne témoin (mm)
CSS-1						
	10 cps/face	94,4%	6223	3381	45,7%	4,58
	30 cps/face	99,1%	12035	6393	46,9%	4,04
	50 cps/face	100,4%	15468	8314	46,2%	3,88
	60 cps/face	100,5%	17354	7817	55,0%	3,92
Stabicol (*)						
	10 cps/face	93,2%	11185	5610	49,8%	1,88
	30 cps/face	98,2%	23134	14341	38,0%	2,29
	50 cps/face	99,8%	26162	18156	30,6%	
	60 cps/face	100,4%	29361	18999	35,3%	

(*): Les briquettes 50 et 60 coups/face Stabicol témoins n'ont pas été testées sur la presse normalisée Marshall, mais les résultats correspondants ont été corrigés en conséquence.

Graphique 6.3 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 2 jours



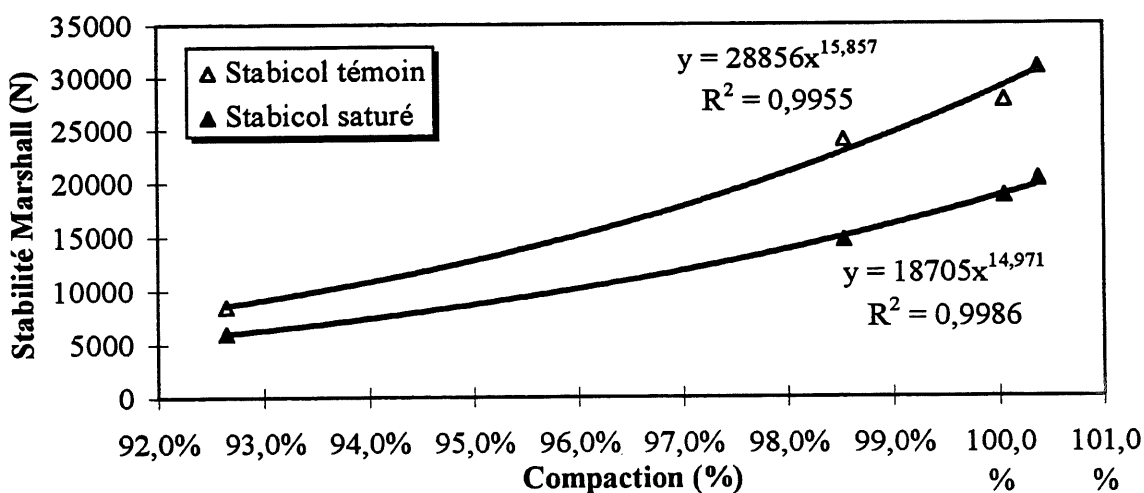
Graphique 6.4 Stabilité Marshall après saturation en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 2 jours



**Tableau 6.4 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall
en fonction du pourcentage de compaction, liant Stabicol
pour une cure normalisée + 4 jours**

Liant	Procédure de compaction	Pourcentage de compaction	Stabilité moyenne témoin (N)	Stabilité moyenne saturée (N)	Perte à saturation (%)	Déformation moyenne témoin (mm)
Stabicol						
	10 cps/face	92,6%	8505	5988	29,6%	1,67
	30 cps/face	98,5%	23983	14655	38,9%	2,33
	50 cps/face	100,0%	27727	18705	32,5%	2,75
	60 cps/face	100,4%	30879	20286	34,3%	2,58

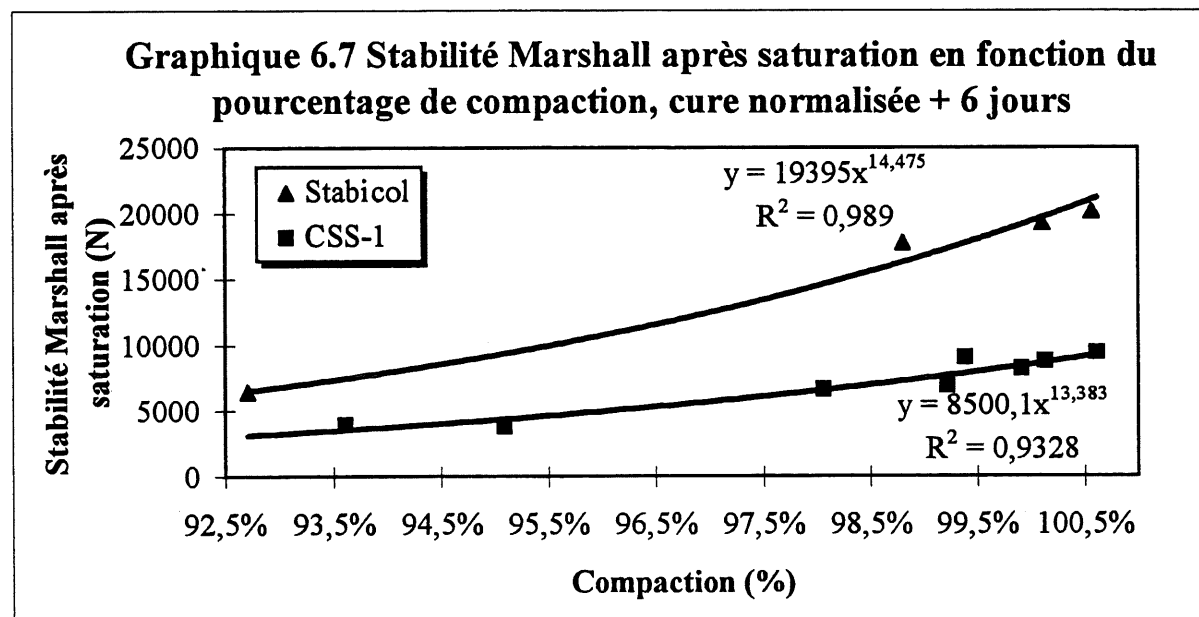
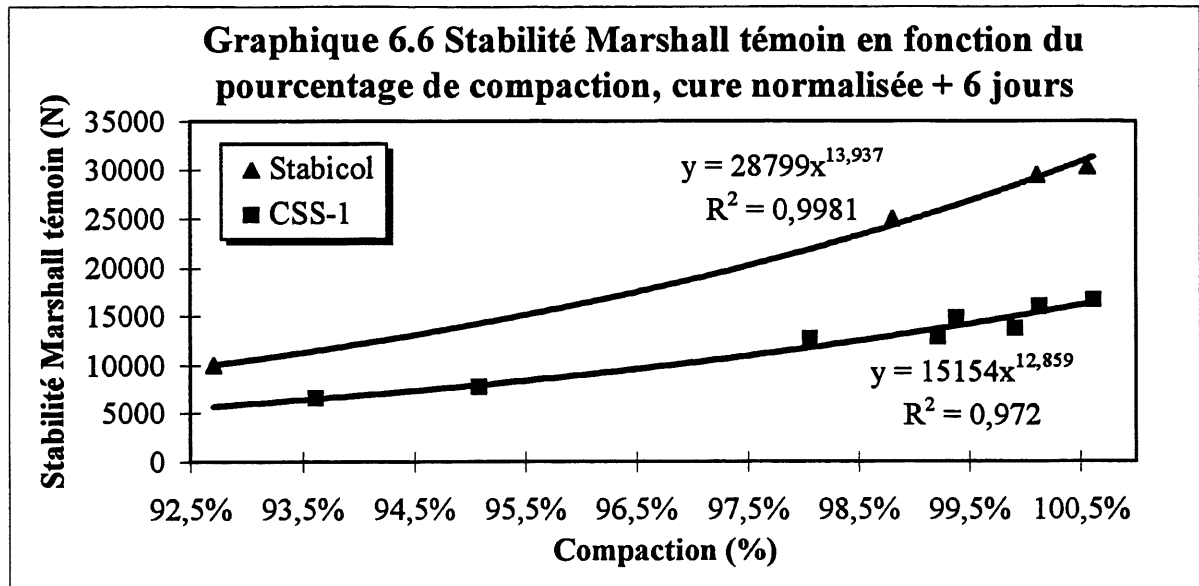
Graphique 6.5 Stabilité Marshall en fonction du pourcentage de compaction, cure normalisée + 4 jours, Stabicol



**Tableau 6.5 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall
en fonction du liant et du pourcentage de compaction
pour une cure normalisée + 6 jours**

Liant	Procédure de compaction	Pourcentage de compaction	Stabilité moyenne témoin (N)	Stabilité moyenne saturée (N)	Perte à saturation (%)	Déformation moyenne témoin (mm)
CSS-1 (2 ^e lot)						
	10 cps/face	95,1%	7697	3773	51,0%	5,33
	30 cps/face	99,2%	12775	6886	46,1%	5,21
	50 cps/face	100,1%	15965	8740	45,3%	5,04
CSS-1 (1 ^{er} lot)						
	10 cps/face	93,6%	6539	3906	40,3%	4,25
	30 cps/face	98,1%	12645	6570	48,0%	3,96
	50 cps/face	99,4%	14826	9014	39,2%	4,21
Stabicol (*)						
	10 cps/face	92,7%	9969	6374	36,1%	1,83
	30 cps/face	98,8%	24986	17736	29,0%	2,13
	50 cps/face	100,1%	29498	19261	34,7%	
Stabicol (*)	60 cps/face	100,6%	30286	20122	33,6%	

(*): Les briquettes 50 et 60 coups/face Stabicol témoins n'ont pas été testées sur la presse normalisée Marshall, mais les résultats correspondants ont été corrigés en conséquence.



On observe une augmentation généralisée de la stabilité Marshall pour tous les groupes de briquettes testées, c.-à-d. pour toutes les procédures de compaction utilisées, pour un état témoin ou après saturation et pour les deux liants étudiés. Ceci est en parfait accord avec les connaissances actuelles relatives à la cure des matériaux stabilisés. Le coefficient "a", des équations relatives aux courbes de lissage de type puissance utilisée (ax^b), augmente de 39,8% et 44% au cours de la période étudiée pour le matériau stabilisé au Stabicol pour un état témoin et après saturation respectivement. Ce même coefficient augmente de 14,3% et 36,8% au cours de la

période étudiée pour le matériau stabilisé au CSS-1 pour un état témoin et après saturation respectivement.

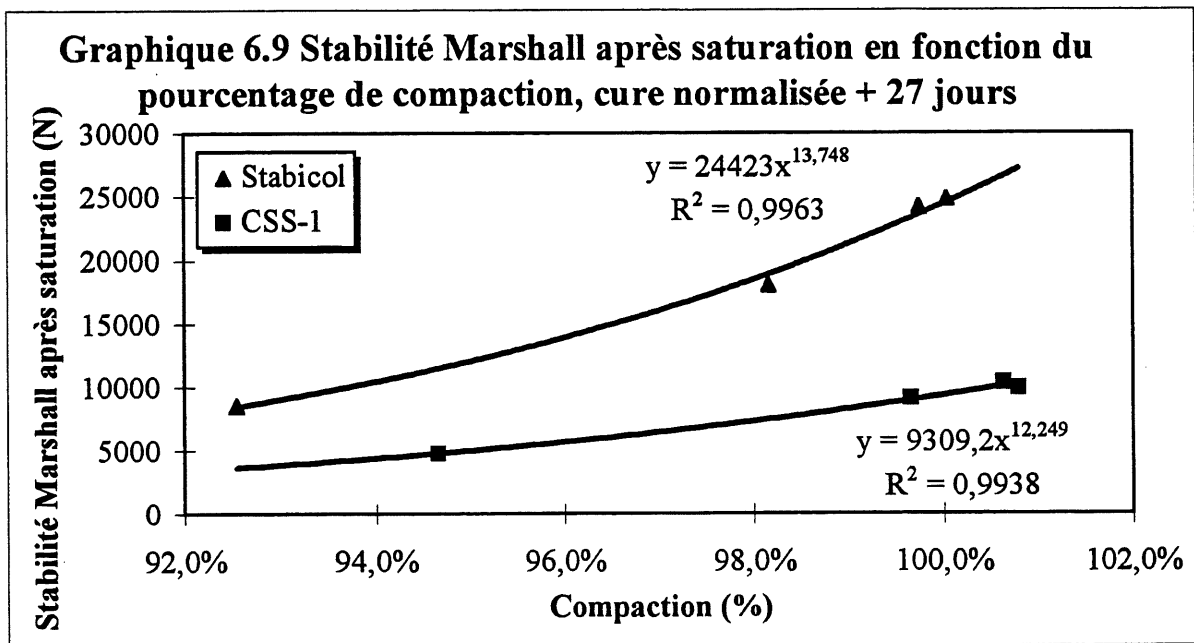
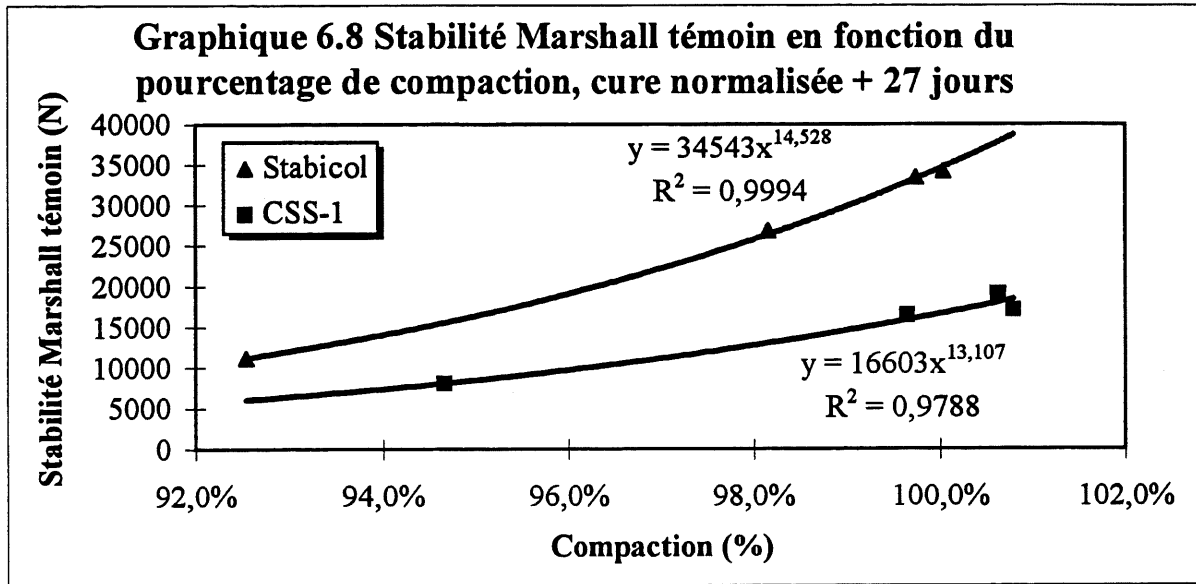
**Tableau 6.6 Résultats moyens obtenus à l'essai Marshall
en fonction du liant et du pourcentage de compaction
pour une cure normalisée + 27 jours**

Liant	Procédure de compaction	Pourcentage de compaction	Stabilité moyenne témoin (N)	Stabilité moyenne saturée (N)	Perte à saturation (%)	Déformation moyenne témoin (mm)
CSS-1						
	10 cps/face	94,7%	8019	4730	41,0%	3,96
	30 cps/face	99,7%	16401	9073	44,7%	4,38
	50 cps/face	100,8%	17022	9856	42,1%	4,33
	60 cps/face	100,6%	18973	10311	45,7%	4,38
Stabicol (*)						
	10 cps/face	92,5%	11163	8502	23,8%	1,79
	30 cps/face	98,2%	26771	18083	32,5%	2,08
	50 cps/face	99,7%	33383	24140	27,7%	
	60 cps/face	100,0%	34196	24804	27,5%	

(*): Les briquettes 50 et 60 coups/face Stabicol témoins n'ont pas été testées sur la presse normalisée Marshall, mais les résultats correspondants ont été corrigés en conséquence.

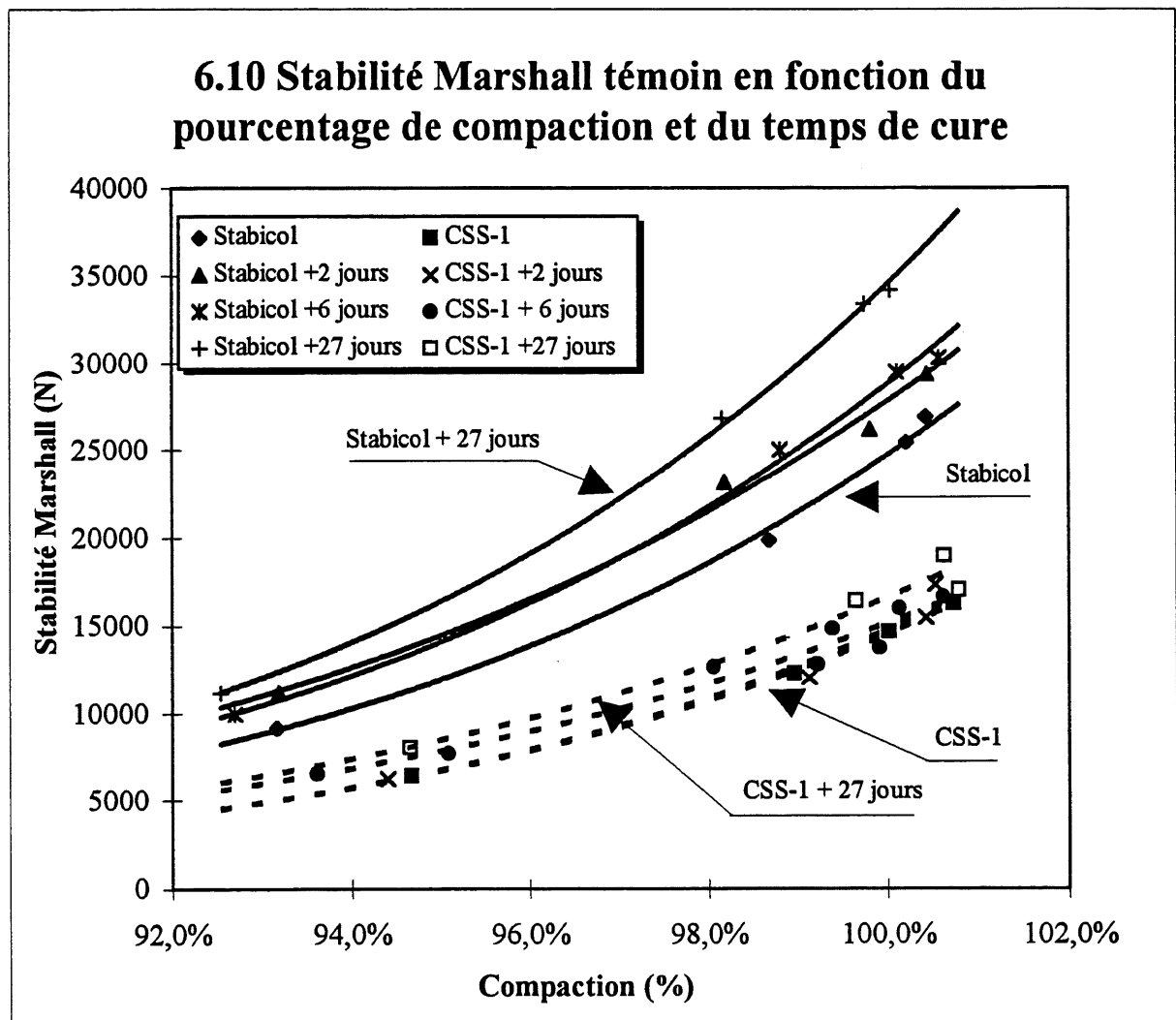
Le coefficient "b" ne suit pas de tendance précise avec les essais à l'état témoin alors qu'il diminue progressivement pour les résultats après saturation, et ce pour les deux matériaux étudiés. Les valeurs de ce coefficient sont d'ailleurs très semblables pour les deux matériaux. La diminution de ce coefficient avec les résultats obtenus après saturation indique que le comportement en fonction du pourcentage de compaction tend à la linéarisation avec le temps, alors que la "courbure en fonction du pourcentage de compaction" demeure sensiblement la même avec les résultats

obtenus témoins, peu importe le temps de cure. On note finalement que les régressions de type "ax^b" semblent toujours lisser les résultats Marshall obtenus avec succès, car les coefficients de détermination R² sont toujours relativement élevés.



Le graphique 6.10 présente les courbes de régression (ainsi que les points expérimentaux) des cures normale, normale + 2 jours, normale + 6 jours et normale + 27 jours pour les essais à l'état

témoin des deux matériaux étudiés. Ce graphique illustre très bien l'augmentation de la stabilité Marshall témoin en fonction du temps de cure observée. La prochaine section analyse de façon plus approfondie la variation de stabilité Marshall en fonction du temps de cure.



6.2.3 Augmentation de stabilité Marshall en fonction du temps

La section précédente a permis d'analyser, de façon générale, les effets d'une cure prolongée sur les différents paramètres obtenus lors de la réalisation des essais Marshall. Cette section s'intéresse particulièrement à la variation de la stabilité Marshall en fonction du temps de cure. L'analyse sera basée sur deux pourcentages de compaction, soit 95% et 100%, et les stabilités Marshall utilisées seront déterminées à partir des équations de comportement présentées sur les graphiques 6.1 à 6.9 inclusivement. Le tableau 6.7 présente ces résultats. Le pourcentage d'augmentation de stabilité Marshall est calculé par rapport aux valeurs obtenues pour la cure normalisée et la cure normalisée + 27 jours. Les graphiques 6.10 et 6.11 illustrent les résultats en fonction du temps pour 100% de compaction.

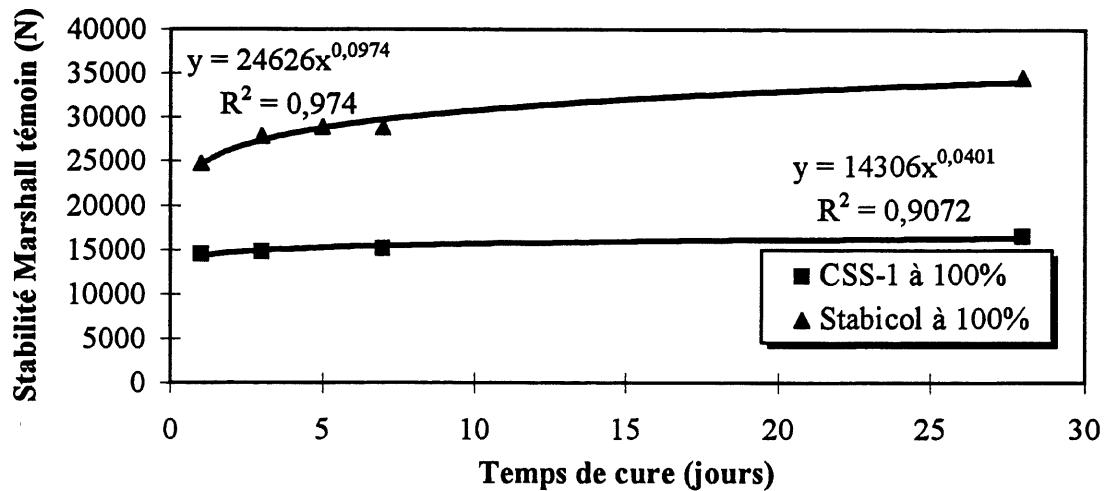
Tableau 6.7 Augmentation de stabilité Marshall en fonction du temps de cure et du liant pour 95% et 100% de compaction

Liant	Type de cure	Stabilité témoin (N)		Stabilité après saturation (N)	
		Compaction		Compaction	
		95%	100%	95%	100%
CSS-1					
	Normalisée	6704	14524	2989	6806
	+ 2 jours	6739	14804	3664	7450
	+6 jours	7836	15154	4279	8500
	+ 27 jours	8476	16603	4966	9309
% d'augmentation		26,4%	14,3%	66,1%	36,8%
Stabicol					
	Normalisée	11950	24704	6944	16966
	+ 2 jours	14455	27809	7857	18515
	+ 4 jours	12794	28856	8679	18705
	+6 jours	14090	28799	9231	19395
	+ 27 jours	16396	34543	12065	24423
% d'augmentation		37,2%	39,8%	73,8%	44,0%

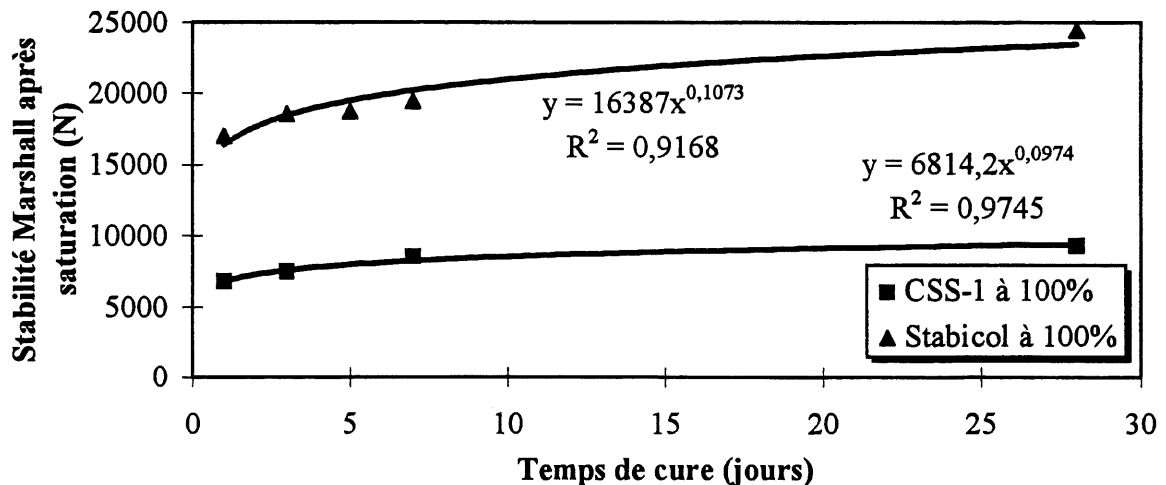
Dans l'ensemble, les valeurs présentées dans ce tableau semblent cohérentes, seule la valeur obtenue pour une cure normalisée + 2 jours, témoin et pour 95% de compaction avec le Stabicol est de toute évidence erronée. Le matériau stabilisé au Stabicol a démontré de meilleurs

pourcentages d'augmentation dans toutes les catégories étudiées. Le matériau stabilisé au Stabicol a donc augmenté, toutes proportions gardées, sa supériorité par rapport au matériau stabilisé au CSS-1 (au niveau de la stabilité Marshall du moins) après 27 jours de cure supplémentaires.

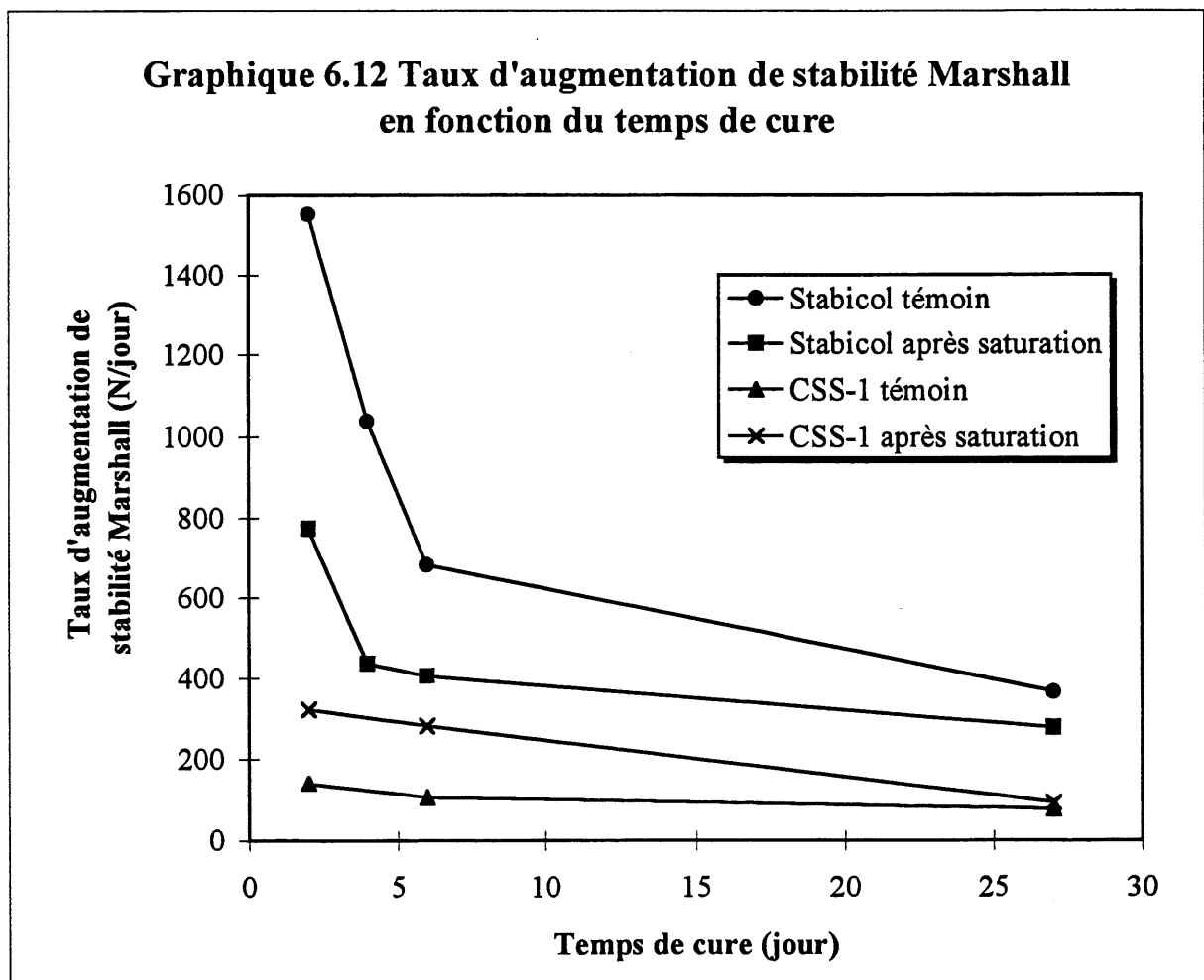
Graphique 6.11a Stabilité Marshall témoin en fonction du temps de cure



Graphique 6.11b Stabilité Marshall après saturation en fonction du temps de cure



Les pourcentages d'augmentation de stabilité sont toujours plus élevés pour des essais après saturation. Les liens formés par les liants seraient donc de plus en plus résistants avec le temps face à une saturation. Cette dernière observation semble particulièrement vraie pour le matériau stabilisé au CSS-1 où les pourcentages d'augmentation après saturation sont 2,5 fois ceux observés avec un état témoin. Dans la section précédente, il fut d'ailleurs remarqué que la perte à la saturation semblait diminuer avec le temps pour le matériau stabilisé au CSS-1. Le graphique 6.12 illustre les taux d'augmentation de stabilité Marshall en fonction du temps pour les matériaux compactés à 100% (calculé par rapport à la stabilité de la cure normalisée). Ce graphique démontre bien les argumentations de ce paragraphe et du précédent. En effet, les courbes du matériau stabilisé au Stabicol présentent des taux d'augmentation supérieurs à celui stabilisé au CSS-1, et le taux d'augmentation de stabilité Marshall après saturation est supérieur à celui correspondant à la condition témoin pour le matériau stabilisé au CSS-1.



Même si l'écart (en pourcentage) diminue un peu entre la stabilité Marshall à 95% et 100% de compaction en fonction du temps, la stabilité Marshall à 100% de compaction (quelques soient le matériau et la condition d'essai) est encore le double de celle obtenue à 95% de compaction après 27 jours de cure supplémentaires. Par conséquent, le pourcentage de compaction semble jouer un rôle prépondérant dans la résistance ultime de ces matériaux, peu importe le temps de cure.

Il est évident qu'après un certain temps de cure (infini), il n'y aura plus d'augmentation de stabilité Marshall. Par conséquent, les graphiques de la stabilité Marshall en fonction du temps devraient présenter une asymptote. Les lissages présentés sur les graphiques 6.10 et 6.11 illustrent, de façon relative, cette affirmation. Cependant, la précision des modèles utilisés (régression de type puissance) n'était pas supérieure dans la majorité des cas à un lissage linéaire qui ne possède naturellement pas d'asymptote. Il est donc évident que la période d'étude était trop courte pour estimer de façon claire la valeur respective de stabilité Marshall maximum des deux matériaux (asymptotes). Par contre, le graphique 6.12 permet d'apprécier la diminution du taux d'augmentation de stabilité Marshall en fonction du temps. Comme il est possible de l'observer, la diminution (pente) de ce taux est relativement prononcée au début, mais (mis à part pour le matériau stabilisé au CSS-1 après saturation) celle-ci décroît considérablement entre 6 et 27 jours de cure supplémentaires (particulièrement pour le matériau stabilisé au Stabicol). Il est impossible de prédire avec précision à l'aide de ce graphique le temps où l'augmentation deviendra pratiquement nulle, mais la diminution prononcée du taux d'augmentation avec le matériau stabilisé au Stabicol laisse présager que ce matériau cure durant moins de temps que celui stabilisé au CSS-1. Les pentes entre 6 et 27 jours sont cependant très semblables pour les deux matériaux.

L'augmentation de résistance chez le matériau stabilisé au Stabicol n'est pas une surprise, car on sait depuis longtemps que l'hydratation du ciment est un processus évoluant dans le temps. Il faut toutefois souligner que les conditions de cure pour le ciment n'étaient pas idéales puisque la teneur en eau dans les briquettes était relativement faible ($<1,5\%$) lorsque celles-ci étaient enveloppées sous pellicule plastique. L'augmentation de résistance observée pour le matériau stabilisé au CSS-1 n'est pas une surprise totale, car certaines études de terrain avaient déjà noté ce comportement. Toutefois, l'explication de cette augmentation de résistance mécanique par les liens formés du liant hydrocarboné est plutôt difficile à expliquer de façon simple. En effet, les phénomènes aidant au

durcissement du bitume, comme l'évaporation et l'oxydation, sont empêchés (ou nettement diminués) par le scellement de la briquette. La réponse se trouve probablement, en partie du moins, dans la chimie des liens et/ou de l'émulsion. Par exemple, il est possible que l'agent émulsifiant utilisé pour disperser le bitume dans l'eau ait une influence pendant un certain temps sur la stabilité des liens formés par le bitume, mais ceci demeure une pure hypothèse.

6.2.4 Analyse statistique des résultats

Les tableaux qui suivent présentent les résultats de l'analyse statistique pour les essais Marshall avec les briquettes testées après avoir été soumises aux cure normalisée +2 jours, +4 jours, +6 jours et +27 jours. Les hypothèses statistiques sont les mêmes que celles exprimées à la section 6.1.3. Comme il est possible de le constater, le pourcentage d'erreur maximal sur la moyenne est généralement inférieur à 10%. Ce pourcentage d'erreur potentiel est jugé très satisfaisant.

**Tableau 6.8 Analyse statistique des résultats Marshall
cure normalisée + 2 jours**

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (N)	Écart-type (N)	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1						
	10 cps/face	Témoin	6223	797	±756	12,2%
		Saturé	3381	215	±204	6,0%
	30 cps/face	Témoin	12035	556	±528	4,4%
		Saturé	6393	299	±284	4,4%
	50 cps/face	Témoin	15468	549	±522	3,4%
		Saturé	8314	904	±858	10,3%
	60 cps/face	Témoin	17354	397	±377	2,2%
		Saturé	7817	992	±943	12,1%
Stabicol (*)						
	10 cps/face	Témoin	11185	1091	±1036	9,3%
		Saturé	5610	440	±418	7,4%
	30 cps/face	Témoin	23134	1589	±1509	6,5%
		Saturé	14341	1014	±963	6,7%
	50 cps/face	Témoin	27921	841	±799	2,9%
		Saturé	18156	1232	±1170	6,4%
	60 cps/face	Témoin	31336	2206	±2095	6,7%
		Saturé	18999	1071	±1017	5,4%

(*): La valeurs moyennes des briquettes 50 et 60 coups/face témoins correspondent aux valeurs moyennes obtenues avec la presse Baldwin sans correction

**Tableau 6.9 Analyse statistique des résultats Marshall
cure normalisée + 4 jours**

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (N)	Écart-type (N)	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
Stabicol						
	10 cps/face	Témoin	8505	366	±348	4,1%
		Saturé	5988	788	±749	12,5%
	30 cps/face	Témoin	23983	1979	±1880	7,8%
		Saturé	14655	968	±920	6,3%
	50 cps/face	Témoin	27727	3263	±3099	11,2%
		Saturé	18705	1209	±1148	6,1%
	60 cps/face	Témoin	30879	1822	±1731	5,6%
		Saturé	20286	2602	±2471	12,2%

**Tableau 6.10 Analyse statistique des résultats Marshall
cure normalisée + 6 jours (CSS-1 1^{er} lot)**

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (N)	Écart-type (N)	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1 (1 ^{er} lot)						
	10 cps/face	Témoin	6539	144	±136	2,1%
		Saturé	3906	400	±380	9,7%
	30 cps/face	Témoin	12645	503	±478	3,8%
		Saturé	6570	438	±416	6,3%
	50 cps/face	Témoin	14826	2076	±1972	13,3%
		Saturé	9014	288	±274	3,0%
	60 cps/face	Témoin	13741	783	±744	5,4%
		Saturé	8130	352	±334	4,1%

**Tableau 6.11 Analyse statistique des résultats Marshall
cure normalisée + 6 jours**

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (N)	Écart-type (N)	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1 (2 ^e lot)						
	10 cps/face	Témoin	7697	161	±153	2,0%
		Saturé	3773	359	±341	9,0%
	30 cps/face	Témoin	12775	589	±559	4,4%
		Saturé	6886	925	±878	12,8%
	50 cps/face	Témoin	15965	815	±774	4,8%
		Saturé	8740	396	±376	4,3%
	60 cps/face	Témoin	16653	266	±253	1,5%
		Saturé	9372	939	±892	9,5%
Stabicol						
	10 cps/face	Témoin	9969	1069	±1015	10,2%
		Saturé	6374	319	±303	4,8%
	30 cps/face	Témoin	24986	2510	±2384	9,5%
		Saturé	17736	1627	±1545	8,7%
	50 cps/face	Témoin	31481	658	±625	2,0%
		Saturé	19261	682	±647	3,4%
	60 cps/face	Témoin	32322	2822	±2680	8,3%
		Saturé	20122	932	±885	4,4%

(*): La valeurs moyennes des briquettes 50 et 60 coups/face témoins correspondent aux valeurs moyennes obtenues avec la presse Baldwin sans correction

**Tableau 6.12 Analyse statistique des résultats Marshall
cure normalisée + 27 jours**

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (N)	Écart-type (N)	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1						
	10 cps/face	Témoin	8019	749	±711	8,9%
		Saturé	4730	997	±947	20,0%
	30 cps/face	Témoin	16401	380	±361	2,2%
		Saturé	9073	564	±536	5,9%
	50 cps/face	Témoin	17022	2106	±2000	11,7%
		Saturé	9856	592	±562	5,7%
	60 cps/face	Témoin	18973	1314	±1248	6,6%
		Saturé	10311	181	±172	1,7%
Stabicol (*)						
	10 cps/face	Témoin	11163	689	±654	5,9%
		Saturé	8502	166	±157	1,8%
	30 cps/face	Témoin	26771	2850	±2707	10,1%
		Saturé	18083	838	±796	4,4%
	50 cps/face	Témoin	35628	1150	±1092	3,1%
		Saturé	24140	2422	±2300	9,5%
	60 cps/face	Témoin	36495	4599	±4368	12,0%
		Saturé	24804	1502	±1426	5,7%

(*): La valeurs moyennes des briquettes 50 et 60 coups/face témoins correspondent aux valeurs moyennes obtenues avec la presse Baldwin sans correction

6.3 Essai Brésilien

6.3.1 Objet et contexte d'étude

L'essai Brésilien est un essai couramment utilisé en mécanique des roches et en béton de ciment pour déterminer la résistance en tension de ces matériaux. Dans le domaine des bétons bitumineux, ce type d'essai peut être utilisé à la fois pour obtenir le module résilient (avec un appareillage adéquat) et la résistance en tension du matériau. Pour cette étude avec des matériaux recyclés stabilisés, seule la résistance ultime en tension fut déterminée. Il est bon de souligner que cet essai détermine de façon *indirecte* la résistance en tension d'un matériau.

En premier lieu, la réalisation de cet essai vise à vérifier le potentiel de celui-ci dans la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés. Certains résultats ont été rapportés par Loisel [LOISEL, 1994], mais ceux-ci sont peu nombreux et seulement une stabilisation au CSS-1 avait alors été étudiée. De plus, cette étude n'avait pas discuté véritablement de la pertinence de cet essai dans le cadre de la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés, car elle visait plutôt à explorer la possibilité d'utiliser cet essai dans le cadre d'une formulation (teneur en bitume optimale).

Les valeurs de résistance en tension des matériaux stabilisés au CSS-1 rapportées par Loisel sont très faibles (de l'ordre de 50 kPa, condition d'essai non-spécifiée mais probablement témoin). Cette étude a donc pour second objectif d'appuyer (ou non) ces valeurs dans le cas d'une stabilisation à l'émulsion de bitume (CSS-1) et de comparer celles-ci avec les résistances en tension du matériau stabilisé au Stabicol. L'ensemble des résultats sera présenté en fonction du pourcentage de compaction.

6.3.2 Présentation et analyse des résultats

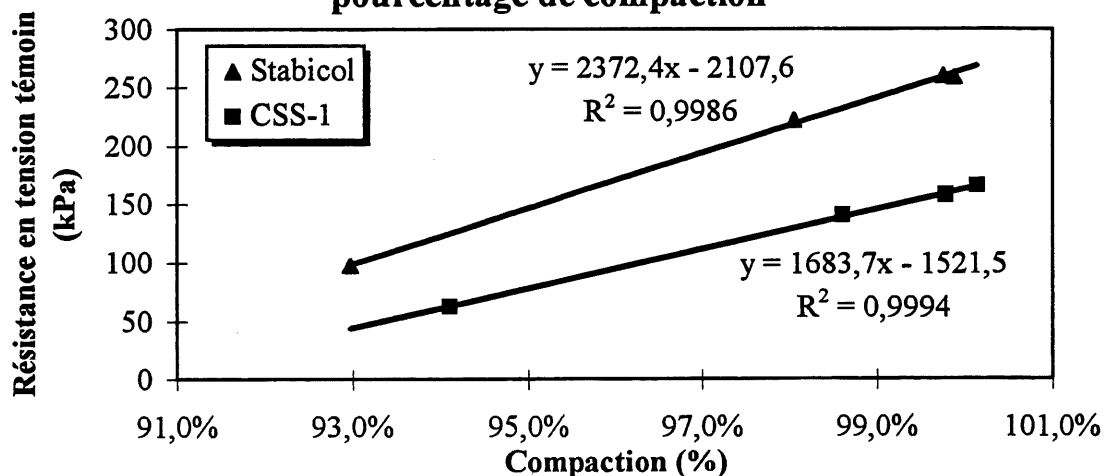
Le tableau 6.13 présente les résultats obtenus lors des essais. Il est bon de souligner que la presse utilisée pour cet essai ne permettait pas d'obtenir une précision supérieure à $\pm 5,5$ kPa (pour les résultats individuels présentés en annexe).

Tableau 6.13 Résistance en tension obtenue à l'essai Brésilien en fonction du liant et du pourcentage de compaction

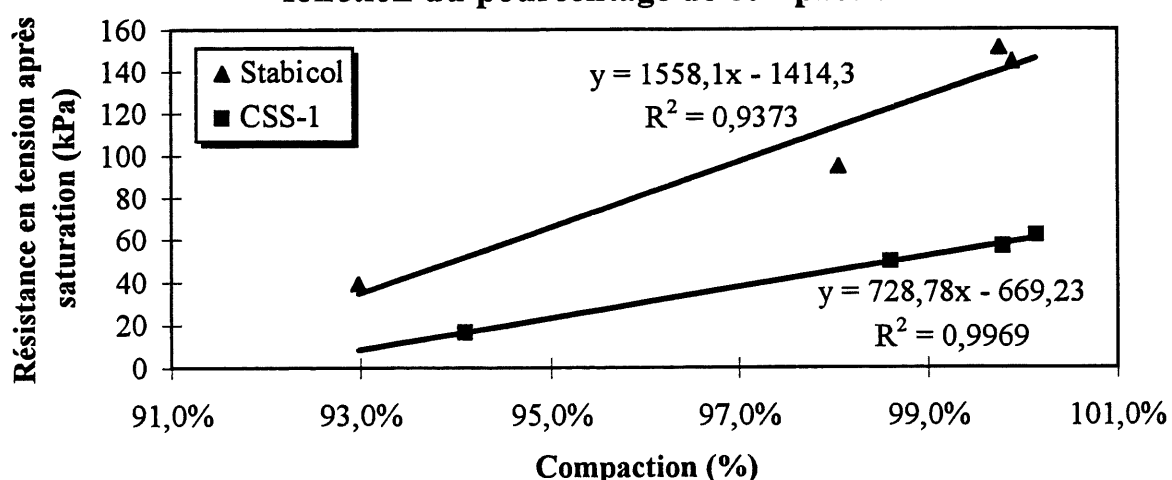
Liant	Procédure de compaction	Pourcentage de compaction	Résistance en tension témoin moyenne (kPa)	Résistance en tension saturée moyenne (kPa)	Perte à saturation (%)
CSS-1					
	10 cps/face	94,1%	62	17	73,5%
	30 cps/face	98,6%	140	50	64,5%
	50 cps/face	99,8%	157	56	64,1%
	60 cps/face	100,1%	165	62	62,5%
Stabicol					
	10 cps/face	93,0%	97	39	59,8%
	30 cps/face	98,1%	222	95	57,3%
	50 cps/face	99,8%	260	151	41,8%
	60 cps/face	99,9%	259	145	44,1%

Les graphiques 6.13 et 6.14 permettent de visualiser les résultats obtenus. Un lissage linéaire fut déterminé optimal pour l'ensemble des résultats, mais un lissage de type puissance (ax^b) aurait été préférable pour les résultats après saturation relatifs au matériau stabilisé au Stabicol. Les tableaux des résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

Graphique 6.13 Résistance en tension témoin en fonction du pourcentage de compaction



Graphique 6.14 Résistance en tension après saturation en fonction du pourcentage de compaction



Les valeurs obtenues sont relativement faibles et en accord (même ordre de grandeur), mais supérieures à celles observées pour l'étude de Loisel. La résistance augmente en fonction du niveau de compaction des deux matériaux stabilisés, ce qui est logique. Les pertes de résistance à la saturation sont sensiblement plus élevées que celles observées avec l'essai Marshall. Sans être une véritable preuve, cette observation est un indice que la saturation affecte davantage les liens (formés par les liants) que la friction intergranulaire. En effet, lors de l'application de la charge durant l'essai Marshall, le matériau résiste en partie grâce à la cohésion développée par le liant et

en partie par la friction intergranulaire. Or, ces deux composantes de la résistance peuvent être diminuées par une saturation (présence d'eau importante). Dans ce contexte, il est difficile d'affirmer laquelle des deux forces est la plus affectée. La résistance en tension ne peut cependant être que le fruit des liens de cohésion formés par le liant. Par conséquent, si les pertes de saturation sont plus élevées avec l'essai Brésilien qu'avec l'essai Marshall, il est sensé de penser que la saturation nuit véritablement (et davantage) à la qualité des liens formés par le liant.

Les baisses de résistance entre les résultats témoins et saturés sont particulièrement élevées avec le matériau stabilisé au CSS-1. En utilisant les équations linéaires obtenues, et pour un pourcentage de compaction de 100%, on retrouve une perte à la saturation de 63,3% pour le matériau stabilisé au CSS-1 et de 45,7% pour celui stabilisé au Stabicol. Le pourcentage de perte à la saturation semble également être influencé à la hausse par une baisse du niveau de compaction, et ce pour les deux matériaux étudiés.

La résistance en tension mesurée est beaucoup plus élevée pour le matériau stabilisé au Stabicol que celui stabilisé au CSS-1. Toujours en utilisant les équations linéaires obtenues et pour un pourcentage de compaction de 100%, la résistance en tension mesurée pour le matériau lié au Stabicol correspond à 163,3% et 241,3% de celle mesurée pour le matériau stabilisé au CSS-1, et ce pour la valeur témoin et saturée respectivement. Néanmoins, les valeurs obtenues sont jugées extrêmement faibles si on les compare à celles obtenues avec le roc ou le béton de ciment.

Un des tableaux présentés en annexe sur l'essai Brésilien qualifie le type de rupture obtenue lors des essais. Normalement, la rupture devrait être parfaitement droite et au centre de l'échantillon. Ce type de rupture est une des hypothèses émises pour l'application de l'équation qui nous permet de déduire la résistance en tension du matériau testé. Si la fissure de rupture est différente du modèle supposé, ceci indique que les efforts de traction ne se sont pas distribués normalement (selon les hypothèses). Cependant, un résultat n'est pas nécessairement rejeté lorsque la fissure de rupture diffère quelque peu du modèle idéal, mais ce critère est important pour juger de façon globale de la bonne ou mauvaise application de l'essai.

Le tableau 6.14 présente la distribution, en pourcentage, de la qualité de la fissure de rupture par rapport au modèle idéal. La catégorie "Quasi parfaite" signifie une fissure idéale. Le qualificatif

"Imperfection légère" est utilisé dans les cas où la fissure n'est pas parfaitement droite et lorsqu'il y a présence dans les zones de compression de petites fissures. La catégorie "Imperfection grave" signifie un écart important entre la fissure et le modèle idéal de rupture: fissure double, ramification à partir de la fissure centrale et zone de compression écrasée. Ces trois premières catégories de rupture possèdent tout de même une fissure au "centre" et le résultat de ces essais est jugé satisfaisant. La dernière catégorie "Mode de rupture différent" est utilisée pour les cas où la rupture n'est pas provoquée, de façon évidente, par une fissure centrale.

Les résultats sont donc jugés satisfaisants. Les fissures de rupture sont de meilleure qualité avec le matériau stabilisé au Stabicol que pour celui stabilisé au CSS-1. Ce comportement est facile à expliquer par le fait que le matériau stabilisé au CSS-1 est plus facile à déformer, qu'il est plus ductile que l'autre matériau. En effet, une des hypothèses de l'essai Brésilien est l'absence de déformation de l'échantillon durant le chargement. Or, le matériau stabilisé au CSS-1 se déformait vraisemblablement davantage engendrant des fissures de rupture de moindre qualité.

**Tableau 6.14 Qualité de rupture obtenue à l'essai Brésilien
selon le liant utilisé**

Qualité de la rupture	CSS-1	Stabicol
Quasi parfaite	33,3%	62,5%
Imperfection légère	33,3%	25,0%
Imperfection grave	29,2%	8,3%
Mode de rupture différent	4,2%	4,2%

6.3.3 Discussion

Les résultats obtenus à l'essai brésilien semblent logiques et cohérents puisque la résistance en tension augmente en fonction du pourcentage de compaction. Le Stabicol a développé plus de résistance que l'émulsion de bitume CSS-1. De plus, les modes de rupture observés sont jugés satisfaisants, mais non parfaits. Les résultats obtenus sont donc crédibles et l'application de l'essai

avec ce type de matériaux semble adéquate pour estimer la résistance en tension, même si l'hypothèse reliée à la non-déformation de l'échantillon n'est pas parfaitement respectée.

Certaines questions sont cependant soulevées sur la pertinence de caractériser ce type de matériau selon sa résistance en traction. En effet, ces matériaux ne sont pas reconnus pour leur excellence dans ce domaine. De plus, leur faiblesse à cet égard est déjà exploitée par certaines firmes pour les utiliser sur un pavé fissuré comme couche anti-remontée de fissure (système de réparation de type "sandwich"). Dans ce cas pratique, plus la résistance en traction est faible plus la remontée des fissures est ralentie. Leur faible résistance en traction, si paradoxal que cela puisse paraître, se transforme en un atout face à la réflexion des fissures. Cette étude a tout de même permis de constater que les liants mixtes bitume+ciment ont tendance à développer une résistance en traction plus élevée qu'une stabilisation à l'émulsion de bitume conventionnelle. À cet égard, leur utilisation dans une réparation du type "sandwich" n'est donc pas nécessairement conseillée. Il ne faudrait quand même pas sauter aux conclusions et affirmer qu'un matériau stabilisé à l'aide d'un liant mixte bitume+ciment ne peut être employé efficacement dans ce genre d'application, mais la prudence est de mise.

6.3.4 Analyse statistique des résultats

Comme pour les essais Marshall, une analyse statistique des résultats a été réalisée et est présentée afin d'estimer la précision obtenue. Les hypothèses statistiques sont les mêmes que celles exprimées à la section 6.1.3. Comme il est possible de le constater grâce au tableau 6.15, la précision semble passablement moins bonne que celle obtenue avec l'essai Marshall. En effet, le pourcentage d'erreur potentiel maximal atteint ici en une occasion 31,2% alors qu'il ne dépassait pas 14% pour l'essai Marshall. Cette augmentation de la marge d'erreur est probablement provoquée par l'imprécision relative de la presse utilisée. En effet, le résultat de charge ultime était précis à 12,5 lb. Avec les dimensions moyennes des échantillons utilisés, ce niveau de précision se traduisait par une erreur possible de 5,5 kPa sur chaque résultat de résistance obtenu. Avec les matériaux normalement testés à l'essai Brésilien (roc et béton de ciment) cette erreur est jugée

insignifiante, mais dans notre cas celle-ci peut avoir un effet certain sur la variation et la précision de la moyenne.

Tableau 6.15 Analyse statistique des résultats de l'essai Brésilien

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (kPa)	Écart-type (kPa)	Intervalle de confianc	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1						
	10 cps/face	Témoin	62	7	±6	9,9%
		Saturé	17	5	±5	31,2%
	30 cps/face	Témoin	140	16	±16	11,2%
		Saturé	50	15	±14	28,8%
	50 cps/face	Témoin	157	12	±11	7,1%
		Saturé	56	11	±11	18,7%
	60 cps/face	Témoin	165	11	±10	6,4%
		Saturé	62	13	±13	20,2%
Stabicol						
	10 cps/face	Témoin	97	17	±17	17,0%
		Saturé	39	10	±9	23,8%
	30 cps/face	Témoin	222	26	±25	11,0%
		Saturé	95	9	±9	9,3%
	50 cps/face	Témoin	260	19	±18	6,9%
		Saturé	151	10	±9	6,2%
	60 cps/face	Témoin	259	34	±32	12,4%
		Saturé	145	22	±21	14,5%

6.4 Essai de compression simple

6.4.1 Objet d'étude

L'essai de compression simple est un des essais les plus employés pour caractériser les matériaux utilisés en génie civil. Cependant, si l'essai de compression simple est utilisé régulièrement pour caractériser plusieurs matériaux en génie civil, son application est peu répandue, au Québec du moins, avec les bétons bitumineux et les matériaux stabilisés.

Cette section de l'étude en laboratoire vise à cerner le potentiel de l'essai de compression simple avec les matériaux recyclés stabilisés, ainsi qu'à obtenir, dans la mesure du possible, des valeurs de référence de la résistance en compression des matériaux recyclés stabilisés. L'étude permettra également la comparaison des résultats entre une stabilisation à l'émulsion CSS-1 et une stabilisation au Stabicol. Finalement, les résultats seront présentés en fonction du pourcentage de compaction des matériaux étudiés.

6.4.2 Présentation et analyse des résultats

Le tableau 6.16 présente les résultats obtenus à l'essai de compression simple. Les graphiques 6.15 et 6.16 permettent de visualiser l'augmentation de résistance en compression en fonction du pourcentage de compaction et présentent les résultats des lissages linéaires effectués. Le résultat moyen obtenu pour la procédure de compaction 60 coups/face testé témoin avec le matériau stabilisé au Stabicol n'a pas été utilisé pour la régression linéaire correspondante à ces résultats, car cette valeur semblait incohérente avec les autres. Les tableaux des résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

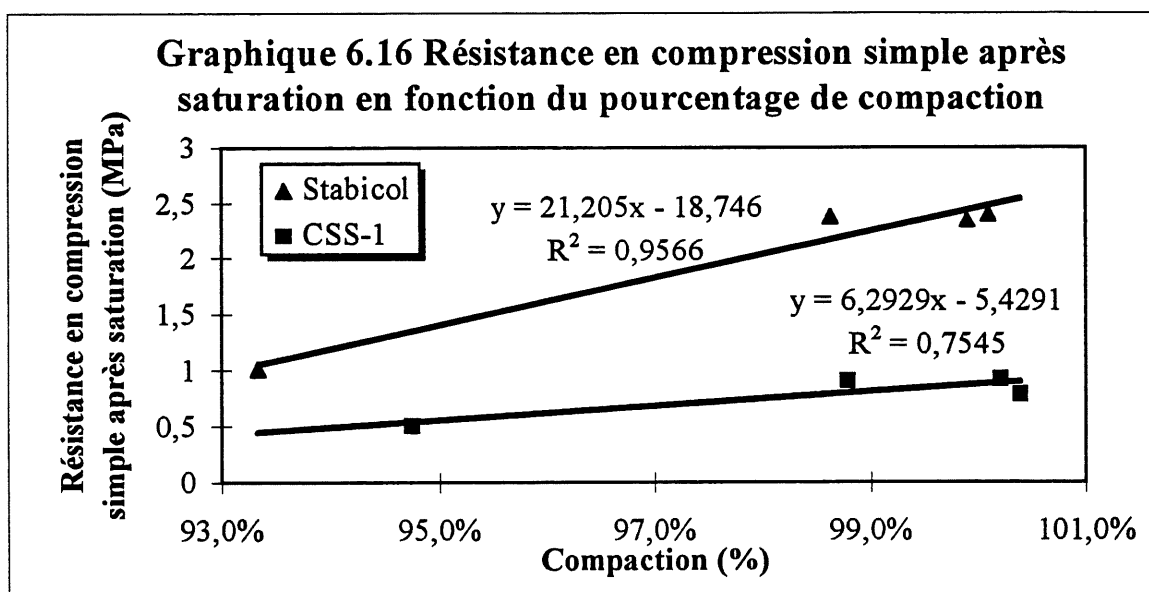
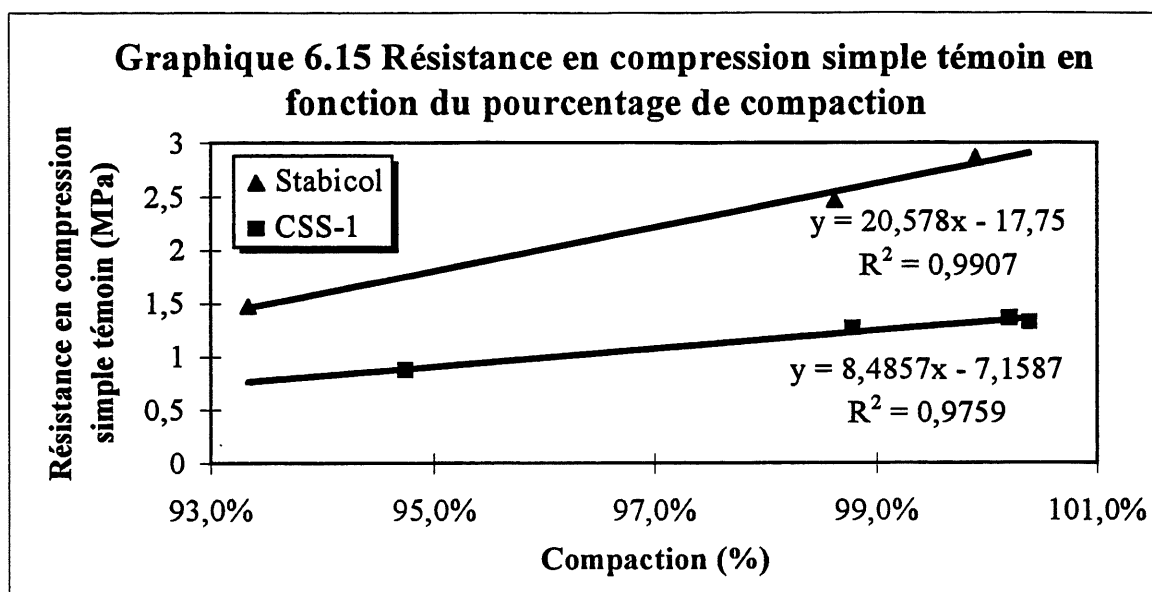
On note en premier lieu que les moyennes obtenues sont relativement variables et qu'aucun lissage, à partir d'équations mathématiques simples et communes, pouvait réellement bien estimer les résultats expérimentaux. Malgré cela, il est bien évident que la résistance en compression

augmente en fonction du pourcentage de compaction. Dans cette situation une régression linéaire semblait être le modèle le plus simple et le meilleur.

Tableau 6.16 Résistance en compression simple en fonction du pourcentage de compaction et du liant

Liant	Procédure de compaction	Pourcentage de compaction	Résistance en compression témoin moyenne (MPa)	Résistance en compression saturée moyenne (MPa)	Perte à saturation (%)
CSS-1					
	10 cps/face	94,7%	0,869	0,501	42,4%
	30 cps/face	98,8%	1,263	0,896	29,1%
	50 cps/face	100,2%	1,359	0,912	32,9%
	60 cps/face	100,4%	1,317	0,776	41,1%
Stabicol					
	10 cps/face	93,3%	1,471	1,001	31,9%
	30 cps/face	98,6%	2,471	2,380	3,7%
	50 cps/face	99,9%	2,868	2,347	18,1%
	60 cps/face	100,1%	4,084	2,396	41,3%

Si l'on considère comme erroné le résultat moyen obtenu pour la procédure de 60 coups/face, témoin avec le Stabicol, les pertes à saturation semblent sensiblement plus faibles que celles observées avec l'essai Marshall, et ce pour les deux matériaux étudiés. On note cependant une variation assez importante à ce chapitre avec des valeurs extrêmes totalement incohérentes (principalement avec le matériau stabilisé au Stabicol). On observe finalement que la perte à la saturation est, comme pour l'essai Brésilien et Marshall, plus faible pour le matériau stabilisé au Stabicol que celui stabilisé au CSS-1. En utilisant les équations linéaires obtenues, la perte à la saturation pour 100% de compaction est de 13,0% et 34,9% pour le matériau stabilisé au Stabicol et au CSS-1 respectivement.



Les valeurs obtenues sont plus élevées que celles rapportées par Loisel [LOISEL, 1994] pour des conditions identiques d'essais (échantillons et type de cure). En effet, Loisel a observé des résistances en compression simple de l'ordre de 0,6 MPa pour une procédure de compaction et de cure normalisée. Néanmoins, nos valeurs sont généralement plus faibles que celles observées par Proteau [PROTEAU, 1995] qui stipule des valeurs entre 4 et 8 MPa (échantillons, conditions d'essai et de cure non-spécifiées) et par le LCPC [LAFON, 1993] qui indique des valeurs entre 5 et 6,5 MPa (14 jours de cure à 18°C). Finalement, Régis [RÉGIS, 1985] précise des valeurs typiques de résistance en compression à l'essai Duriez qu'il faut atteindre (LCPC), celles-ci varient de 2 à

4 MPa selon le type de bitume contenu dans l'émulsion. Il faut noter que l'essai de compression Duriez n'est pas un essai de compression *simple*.

Le matériau stabilisé au Stabicol développe toujours plus de résistance en compression simple que le matériau stabilisé au CSS-1. En utilisant les équations linéaires obtenues, et pour 100% de compaction, la résistance en compression du matériau stabilisé au Stabicol est 2,13 et 2,85 fois plus élevée que celle du matériau stabilisé au CSS-1 pour une condition d'essai témoin et après saturation respectivement. Notons que cette différence est un peu moindre pour des pourcentages de compaction plus faibles.

La norme ayant servi de guide pour cette expérimentation (BNQ 2622-912) spécifie un taux de chargement de 1,4 à 3,5 kg/cm²/sec., c.-à-d. 137,3 à 343,3 kPa/sec. Le tableau présenté en annexe donne les taux de chargement pour chacun des essais effectués. Il n'est pas nécessaire de présenter ici l'ensemble de ces résultats, mais il nous apparaît important de noter qu'il a été impossible d'atteindre le taux de chargement prescrit avec le matériau stabilisé au CSS-1. En effet, la moyenne du taux de chargement atteinte avec ce matériau est de 110 kPa/sec, alors qu'une moyenne de 253 kPa/sec a été atteinte avec le matériau stabilisé au Stabicol. Ceci peut avoir eu une influence sur la résistance en compression ultime mesurée. Un autre point noté lors des essais est la déformation de type "baril" obtenue sur tous les échantillons. Cette observation indique clairement qu'il y a présence de friction non-négligeable entre la surface des plateaux de la presse et celles des échantillons. Notons que les dimensions des échantillons (100 mm de diamètre par 63 mm de hauteur) et la flexibilité relativement élevée des matériaux contribuent également à une rupture par écrasement (déformation de type "baril").

6.4.3 Discussion et recommandations

Il est difficile de comparer les résultats obtenus avec notre matériau stabilisé au CSS-1 et les valeurs de résistance en compression présentées dans la littérature, car ces dernières sont très variables, les procédures d'essais sont souvent absentes et les dimensions des échantillons utilisés ne sont pas toujours mentionnées. Cependant, nos valeurs se retrouvent à l'intérieur de la plage de

valeurs observées (de 0,5 MPa à 8 MPa). Il semble cependant évident, à la lumière des valeurs décrites dans la littérature, que le type et la durée de la cure influencent de façon importante la résistance en compression des matériaux stabilisés.

L'essai de compression simple a permis d'obtenir des résultats généralement logiques, c.-à-d. que la résistance en compression augmente en fonction du niveau de compaction et que celle-ci diminue après saturation. Il est donc possible d'affirmer que les résultats obtenus avec l'essai de compression simple sont assez crédibles. Cependant, quelques essais (particulièrement ceux réalisés avec les échantillons compactés à 60 coups/face) ont démontré des écarts de résistance appréciables avec l'ensemble des autres résultats. Les dimensions des échantillons n'étaient pas idéales, et ceci peut expliquer en grande partie ces variations importantes. Cet essai ne peut donc pas être employé de façon imminente, avec une bonne précision, dans la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés selon la procédure et les dimensions (effets d'extrémité) des échantillons utilisés dans cette étude.

En effet, une étude de caractérisation avec des échantillons de dimensions conventionnelles (pour cet essai), c.-à-d. un rapport hauteur sur diamètre approximatif de 2, devrait idéalement être menée avant de statuer sur l'utilisation à grande échelle de ce type d'essai dans le cadre de la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés.

Notons finalement que le matériau stabilisé au Stabicol a obtenu des résultats significativement plus élevés ainsi qu'une baisse de résistance après saturation moins importante que le matériau stabilisé au CSS-1.

6.4.4 Analyse statistique des résultats

Comme pour les autres essais, une courte analyse statistique a été menée afin d'estimer la précision relative des moyennes obtenues. Le tableau 6.16 présente les résultats de cette analyse. Il est plutôt surprenant d'observer une précision assez bonne dans les résultats sur la moyenne. En effet, mis à part deux moyennes où le pourcentage d'erreur potentiel maximal est de l'ordre de 20%, la précision est relativement bonne. Il est difficile dans ces conditions d'expliquer pourquoi certaines valeurs moyennes sont si différentes des autres. Il est possible que le modèle de régression linéaire (principalement pour le Stabicol témoin) ne soit pas bien adapté au véritable comportement du matériau, mais il était impossible dans certains cas de présenter un modèle simple et adéquat avec les résultats moyens obtenus. Il demeure donc beaucoup de questionnement sur la validité et la cohérence des résultats obtenus par un tel essai (pour la procédure et les échantillons utilisés) avec les matériaux recyclés stabilisés.

**Tableau 6.17 Analyse statistique des résultats à l'essai
de compression simple**

Liant	Procédure de compaction	Témoin ou saturé	Valeur moyenne (MPa)	Écart- type (MPa)	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1						
	10 cps/face	Témoin	0,869	0,053	±0,050	5,8%
		Saturé	0,501	0,053	±0,050	10,0%
	30 cps/face	Témoin	1,263	0,062	±0,059	4,6%
		Saturé	0,896	0,193	±0,183	20,4%
	50 cps/face	Témoin	1,359	0,041	±0,039	2,8%
		Saturé	0,912	0,079	±0,075	8,2%
	60 cps/face	Témoin	1,317	0,057	±0,054	4,1%
		Saturé	0,776	0,101	±0,096	12,3%
Stabicol						
	10 cps/face	Témoin	1,471	0,187	±0,177	12,0%
		Saturé	1,001	0,153	±0,145	14,5%
	30 cps/face	Témoin	2,471	0,090	±0,085	3,4%
		Saturé	2,380	0,075	±0,071	3,0%
	50 cps/face	Témoin	2,868	0,620	±0,589	20,5%
		Saturé	2,347	0,134	±0,127	5,4%
	60 cps/face	Témoin	4,084	0,197	±0,187	4,6%
		Saturé	2,396	0,141	±0,134	5,6%

6.5 Essais CBR (California Bearing Ratio)

6.5.1 Contexte général d'étude

Il existe peu de moyens simples d'obtenir des indices de portance en laboratoire. En effet, la recherche d'un module en laboratoire demande généralement un appareillage complexe et onéreux. L'essai CBR est utilisé depuis plus d'un demi-siècle pour obtenir un indice de portance avec les sols (fins et grossiers). Cet indice permet, à l'aide de certaines corrélations [HUANG, 1993] [YODER et coll., 1975] [PACKARD, 1984], d'obtenir une estimation du module élastique ou un coefficient structural du sol testé. Malheureusement, sa validité est de plus en plus mise en doute. Malgré tout, il représente encore un des moyens les plus simples pour obtenir un indice de portance d'un sol en laboratoire et sur le terrain. De plus, il existe des références disponibles importantes pour la majorité, sinon la totalité, des types de sols utilisés dans le domaine des chaussées. On note que l'indice CBR semble permettre de meilleures estimations de modules avec les sols fins et peu portant [HUANG, 1993].

Les matériaux recyclés stabilisés peuvent être vus comme des sols grossiers cohésifs ou plus exactement comme des granulats englobés dans un mastic. Dans ce contexte, l'essai CBR pouvait être envisagé comme un moyen simple d'obtenir en laboratoire un indice de portance des matériaux recyclés stabilisés. Afin de vérifier l'applicabilité de l'essai avec les matériaux étudiés, plusieurs investigations ont été menées. En tout, plus de 130 essais CBR ont été réalisés (dont une vingtaine dits "sacrifices"). Bon nombre de procédures ont dû être inventées ou modifiées afin d'atteindre les paramètres physiques recherchés (pour plus d'informations à cet égard voir section 4.3.5).

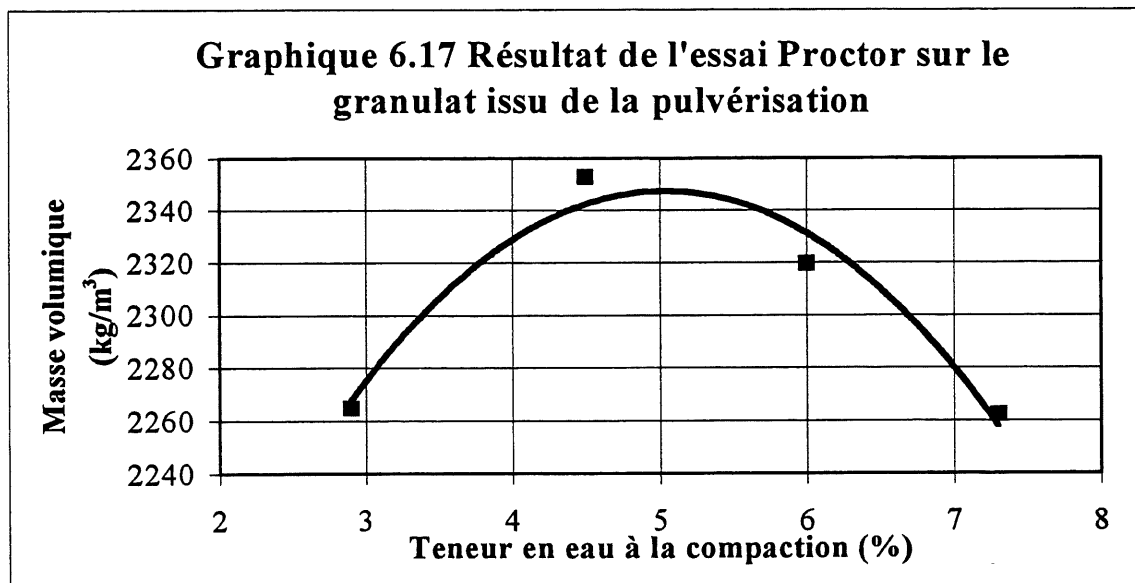
Principalement, deux types d'études ont été réalisées; une étude portant sur la variation de masse volumique et une autre sur la variation du temps de cure. Chacune des études a été réalisée sur les deux matériaux étudiés, pour une condition témoin et après immersion de 24 heures. De plus, neuf essais furent réalisés sur le matériau pulvérisé (sans stabilisation). Il est important de souligner que pour tous les essais présentés ici, l'indice CBR utilisé est celui obtenu pour 0,2" de pénétration. En effet, comme la norme le prescrit, c'est l'indice le plus élevé entre celui obtenu à

0,2" de pénétration et celui à 0,1" de pénétration qui est conservé. Dans tous les cas, l'indice à 0,2" s'est avéré plus élevé.

6.5.2 Essais sur le matériau pulvérisé (sans liant d'ajout)

Essai proctor

Puisqu'un des paramètres de l'étude est la variation de masse volumique sèche, les essais CBR sur le matériau pulvérisé ont également été présentés en fonction de celui-ci. La variation de masse volumique étant elle-même définie par un pourcentage de compaction calculé par rapport à une valeur de masse volumique maximale de référence, un essai Proctor modifié sur le matériau pulvérisé a été effectué afin d'obtenir cette valeur de référence pour ce type de matériau. Le graphique 6.17 présente le résultat de l'essai Proctor modifié.



La masse volumique maximale est donc de 2347 kg/m^3 et la teneur en eau optimale à la compaction est de 5%. Il est remarquable de constater que la teneur en eau optimale est approximativement la même que celle obtenue avec le matériau stabilisé lors de la formulation.

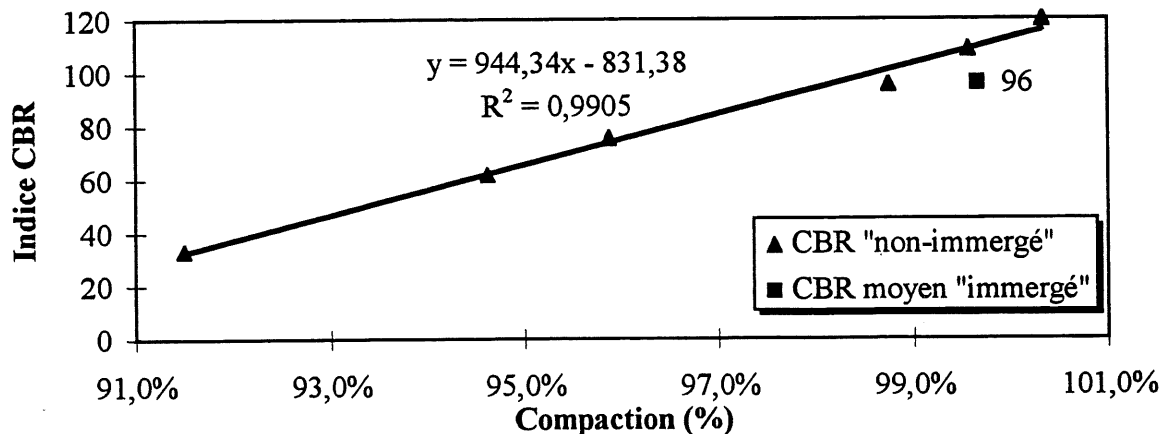
Essais CBR

Au total, neuf essais CBR furent réalisés sur le granulat issu de la pulvérisation. Six essais ont été réalisés sans immersion et trois après immersion. Les six essais réalisés sans immersion faisaient varier la masse volumique afin d'obtenir un indice CBR en fonction de ce paramètre pour le matériau pulvérisé (pourcentage de compaction calculé en fonction de la masse volumique sèche maximale obtenue à l'essai Proctor modifié).

Tableau 6.18 Indices CBR en fonction du pourcentage de compaction, granulat recyclé

Immergé ou non-immergé	Pourcentage de compaction	Indice CBR (à 0,2" de pénétration)	W% finale	
			2,5 ^{er} cm	moyenne
non-immergé	91,5%	33	4,78%	4,78%
non-immergé	94,6%	62	4,87%	4,87%
non-immergé	95,9%	76	4,81%	4,81%
non-immergé	98,7%	96	4,60%	4,60%
non-immergé	99,6%	109	4,65%	4,65%
non-immergé	100,3%	120	4,87%	4,87%
immérgé	100,3%	88	5,27%	4,86%
immérgé	99,0%	111	5,03%	4,86%
immérgé	99,7%	89	5,05%	4,98%

Graphique 6.18 Indice CBR en fonction du pourcentage de compaction pour le granulat recyclé



Le tableau 6.18 et le graphique 6.18 présentent les résultats obtenus. On peut observer une excellente relation linéaire entre le pourcentage de compaction du matériau pulvérisé et l'indice CBR. En utilisant l'équation de régression, on note un indice CBR de 113 pour 100% de compaction pour des essais effectués sans immersion. Pour un pourcentage de 99,7% (moyenne), les essais effectués après immersion présentent un indice moyen de 96 et, pour ce même pourcentage de compaction, on calcule un indice CBR de 110 pour un essai sans immersion. En conséquence, on note une diminution de 12,7% de l'indice CBR avec une immersion sur le matériau pulvérisé. Il est bon de souligner que les indices obtenus sont excellents et sont équivalents à ceux obtenus avec une pierre concassée typique. De plus, nos résultats sont cohérents avec ceux présentés par le Ministère des Transports du Québec pour des granulats contenant du béton bitumineux concassé [BERGERON et coll., 1995]. L'indice CBR de référence est habituellement celui obtenu après immersion. Un tableau complet des résultats est présenté en annexe à la section correspondante.

6.5.3 Étude de l'indice CBR en fonction de la masse volumique pour les matériaux recyclés stabilisés

Objet et contexte d'étude

La présente étude vise à percevoir l'influence du pourcentage de compaction sur l'indice CBR obtenu sur les matériaux recyclés stabilisés. La condition physique initiale des matériaux stabilisés, immédiatement après la compaction et/ou sans aucune période de cure, ne nous semblait pas représentative. Par contre, un curage trop important n'était pas désiré. D'une part, parce que ce type de curage aurait demandé beaucoup de temps et d'autre part, parce que l'effet d'un curage élevé aurait pu "camoufler" le comportement relatif à la variation de masse volumique sèche. En conséquence, un curage de deux jours dans une chambre à température et humidité contrôlées fut jugé adéquat pour les échantillons non immergés, alors que les échantillons immergés étaient transférés après une journée de cette chambre dans un contenant prévu pour l'immersion (à la même température). Pour plus d'informations au sujet des procédures de curage relatives à l'essai CBR voir section 4.3.5. Il est bon de souligner que le pourcentage de compaction est calculé en fonction des valeurs de référence de masses volumiques sèches calculées avec les briquettes

Marshall, c.-à-d. 2242 kg/m³ et 2293 kg/m³ pour le matériau stabilisé au CSS-1 et celui stabilisé au Stabicol respectivement.

Présentation et analyse des résultats

Les tableaux 6.19 et 6.20 présentent les résultats des indices CBR obtenus en fonction du pourcentage de compaction observé pour les deux liants, avec et sans immersion. Les graphiques 6.19 et 6.20 illustrent ces résultats et présentent les régressions linéaires dérivées de ceux-ci. Tous les résultats sont disponibles en annexe à la section correspondante.

Tableau 6.19 Indice CBR sans immersion en fonction du liant et du pourcentage de compaction

CSS-1				Stabicol			
Pourcentage de compaction	Indice CBR (à 0,2" de pénétration)	W% finale		Pourcentage de compaction	Indice CBR (à 0,2" de pénétration)	W% finale	
		2,5 ^{er} cm	moyenne			2,5 ^{er} cm	moyenne
94,9%	19	4,08%	4,70%	93,9%	117	3,49%	4,12%
95,2%	19	4,31%	4,37%	94,5%	135	3,60%	3,96%
95,3%	25	3,63%	4,33%	96,9%	131	3,53%	4,40%
95,8%	23	3,87%	4,31%	97,9%	166	2,83%	3,90%
96,8%	19	3,96%	4,44%	98,5%	133	3,65%	4,56%
97,5%	23	3,70%	4,48%	98,6%	137	2,92%	4,13%
98,2%	24	3,43%	4,21%	98,9%	160	3,14%	4,13%
98,5%	24	3,36%	4,25%	99,4%	148	3,67%	4,25%
98,5%	22	3,86%	4,08%	99,6%	129	3,59%	4,44%
98,5%	28	3,31%	4,26%	99,9%	133	3,46%	4,47%
99,0%	25	3,16%	3,77%				
99,1%	21	3,33%	4,16%				
Moyenne	22,7	3,67%	4,28%	Moyenne	138,8	3,39%	4,24%

Les indices CBR du matériau stabilisé avec du Stabicol sont beaucoup plus élevés que ceux obtenus avec le matériau stabilisé au CSS-1. Ce comportement n'est pas une surprise, car il est déjà reconnu que le gain de portance est beaucoup plus rapide avec une stabilisation à l'aide d'un liant mixte qu'avec une émulsion de bitume. De plus, il est probable que la stabilisation au Stabicol soit moins influencée par le taux d'évaporation qu'une stabilisation au CSS-1. Il est donc normal

que, pour les conditions de curage imposées, le matériau stabilisé au Stabicol obtienne des indices CBR nettement supérieurs.

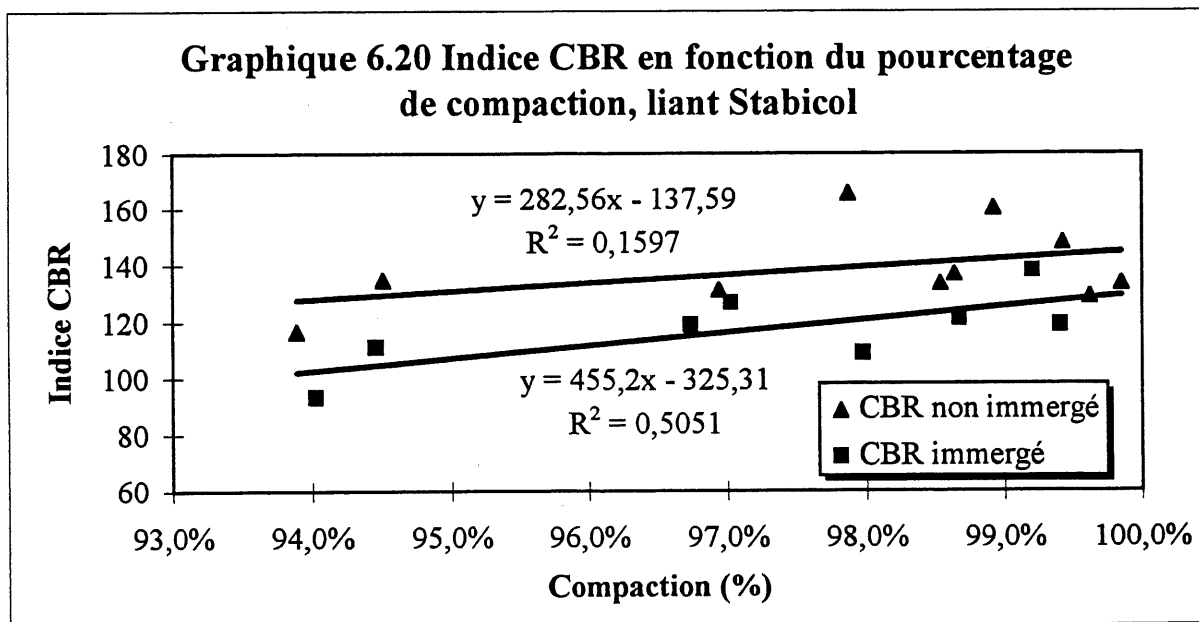
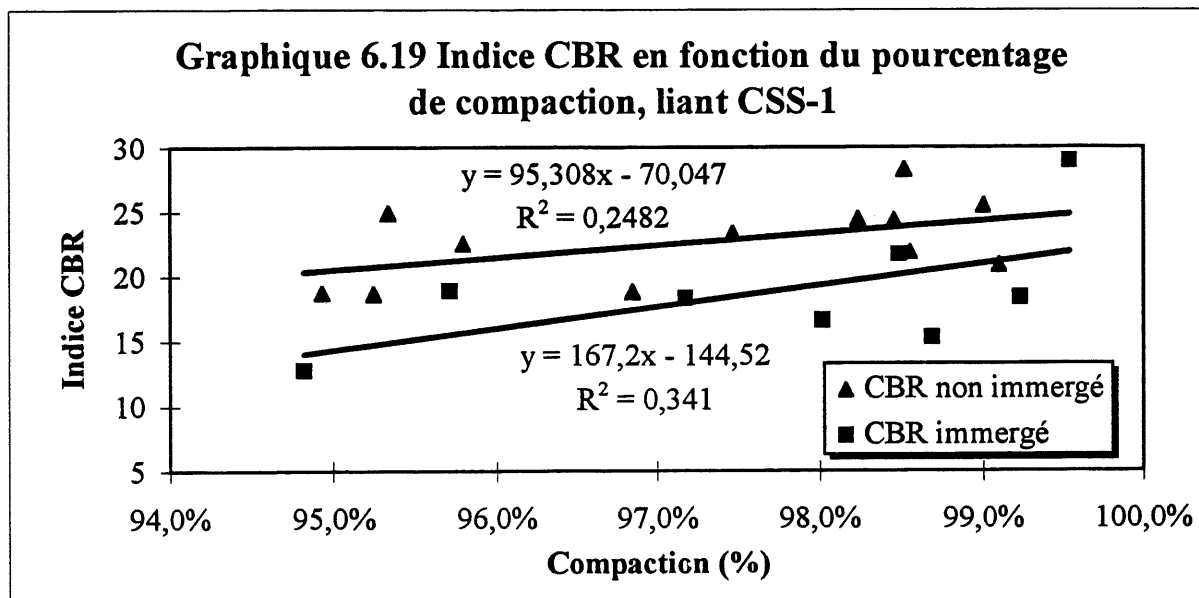
Tableau 6.20 Indice CBR avec immersion en fonction du liant et du pourcentage de compaction

CSS-1				Stabicol			
Pourcentage de compaction	Indice CBR (à 0,2" de pénétration)	W% finale		Pourcentage de compaction	Indice CBR (à 0,2" de pénétration)	W% finale	
		2,5 ^{er} cm	moyenne			2,5 ^{er} cm	moyenne
94,8%	13	5,78%	6,38%	94,0%	93	5,71%	6,64%
95,7%	19	5,72%	5,56%	94,4%	111	5,39%	5,72%
97,2%	18	5,44%	5,56%	96,7%	119	5,74%	5,74%
98,0%	17	5,29%	5,07%	97,0%	127	5,58%	5,59%
98,5%	22	5,18%	5,15%	98,0%	109	5,28%	5,62%
98,7%	15	5,42%	5,36%	98,7%	121	5,45%	5,41%
99,2%	18	4,64%	4,92%	99,2%	138	4,89%	5,31%
99,5%	29	5,03%	5,02%	99,4%	119	5,29%	5,24%
Moyenne	18,8	5,31%	5,38%	Moyenne	117,1	5,42%	5,66%

On observe des indices CBR très peu élevés avec le matériau stabilisé au CSS-1. En fait, les indices mesurés sont plus faibles que ceux obtenus avec le matériau pulvérisé (même pour un pourcentage de compaction faible). Ce comportement n'est pas une surprise en soi. En effet, il est connu qu'à jeune âge les matériaux stabilisés au CSS-1 sont potentiellement moins portants qu'un simple granulat recyclé (issu de l'étape de pulvérisation) compacté. Ce qui étonne cependant, c'est l'énorme différence entre les deux sources de résultats. D'une part le matériau pulvérisé compacté à 100% présente un indice CBR moyen de 113, d'autre part le matériau stabilisé au CSS-1 à jeune âge sans immersion obtient un CBR (calculé avec l'équation) de 25. Le matériau stabilisé au Stabicol dépasse significativement le matériau pulvérisé à cet égard avec un indice CBR de 145.

Les pertes d'indice CBR observées avec une immersion sont approximativement de 10% pour les deux matériaux étudiés. Ce pourcentage se compare assez bien à celui obtenu avec le matériau pulvérisé. On note une absorption un peu plus élevée avec le matériau stabilisé au Stabicol. Il est

bon de souligner que l'immersion imposée aux échantillons CBR n'est pas comparable à la saturation à laquelle les briquettes Marshall ont été soumises.



La relation entre l'indice CBR et le pourcentage de compaction n'est pas très prononcée (pente relativement faible) si on la compare à celle observée pour le simple matériau pulvérisé. En effet, la pente observée avec le matériau stabilisé au CSS-1, pour une condition témoin, est près de 10

fois moins importante que celle obtenue avec le granulat issu de la pulvérisation. Alors que, pour les mêmes conditions d'essai, la pente correspondante au matériau stabilisé au Stabicol est 3,3 fois moins prononcée que celle relative au matériau pulvérisé. De plus, la variation dans les résultats est très élevée si on la compare à celle obtenue avec ce dernier. Les coefficients de détermination (R^2) attachés aux régressions linéaires des deux matériaux étudiés sont très bas, alors que celui obtenu avec le matériau pulvérisé est excellent. Il faut souligner que l'indice de détermination n'est pas toujours un indicateur fiable de la qualité d'un modèle de régression. Malgré cela, il semble évident qu'aucun comportement mathématique logique ne pouvait estimer avec un coefficient de détermination élevé les résultats d'indices CBR obtenus (variation trop importante). Malgré cette variation élevée dans les résultats, le nombre total d'essais relativement important (38 essais) permet d'affirmer que la présence de liant diminue l'effet (pente) normalement observé sur l'indice CBR en fonction de la variation du niveau de compaction.

Il est évident que les résultats obtenus dans cette étude ne sont pas à la hauteur de nos attentes, mais le comportement général observé demeure logique (augmentation de l'indice CBR en fonction du pourcentage de compaction). Par conséquent, on ne peut pas juger véritablement, à ce stade, de l'applicabilité de l'essai CBR avec les matériaux recyclés stabilisés. Cependant, il est semble que l'essai CBR ne s'avère pas très utile pour estimer, avec une précision élevée, ce type de comportement.

6.5.4 Étude de curage

Objet et contexte d'étude

La variance observée dans les résultats de l'étude sur la variation de la masse volumique sèche est très élevée. Cependant, il est toujours possible, en effectuant plusieurs essais CBR, d'obtenir une valeur moyenne valable de l'indice et, par conséquent, d'en déduire un module de portance pour des conditions optimales ou spécifiques. Néanmoins, (et principalement pour les matériaux stabilisés avec une émulsion de bitume) les temps de curage relativement longs que nécessite ce type de matériau peuvent devenir embarrassants, surtout lorsque l'on prend en considération le fait que l'échantillon CBR doit demeurer dans son moule durant tout ce temps.

Par conséquent, il fut décidé d'effectuer trois essais CBR par condition d'essai. Ces conditions étaient 0, 24, 48, 72 et 168 heures de curage dans l'étuve à 38°C, alors que 24 heures dans l'eau étaient ajoutées à ces conditions de cure pour les essais avec immersion. Ainsi, l'effet de la variation dans les résultats serait atténué par le calcul d'une moyenne à partir de trois échantillons (comme pour les autres types d'essais). La procédure de compaction utilisée a permis d'atteindre entre 98,3% et 99,7% de compaction. Les différences de pourcentage de compaction n'ont pas été prises en compte, c.-à-d. qu'aucune correction ne fut établie sur les résultats en fonction de ce paramètre. En effet, les relations préalablement établies semblaient peu fiables et n'avaient pas été obtenues pour des conditions similaires de curage. De plus, la plage de masse volumique obtenue dans cette étude est relativement faible et possède, par conséquent, peu d'influence sur les résultats.

Les objectifs de cette étude étaient de statuer véritablement sur la faisabilité et l'applicabilité de l'essai dans le cadre des matériaux recyclés stabilisés (du point de vue technique, statistique et pratique), et de comparer le taux de curage avant recouvrement des deux matériaux étudiés. L'obtention de valeurs types était également espérée.

Présentation et analyse des résultats

Les tableaux 6.21 et 6.22 présentent les moyennes des indices CBR obtenus en fonction du temps de curage. De plus, ces tableaux permettent de connaître la teneur en eau finale (après essai) moyenne et pour les 2,5^{er} cm (sur la surface utilisée pour l'essai) de matériaux. La teneur en eau finale théorique est calculée en supposant une teneur en eau après compaction de 5,5% et par le poids initial et final du matériau dans le moule.

Tableau 6.21 Indice CBR moyen sans immersion en fonction du curage et du liant

Liant	Nombre d'heures de cure	CBR moyen (à 0,2" de pénétration)	W% finale moyenne		W% finale théorique moyenne	% de compaction moyen
			2,5 ^{er} cm	moyenne		
CSS-1						
	0	11	5,26%	5,26%	5,34%	99,15%
	24	34	2,47%	3,23%	3,44%	99,01%
	48	36	1,98%	2,86%	3,04%	99,42%
	72	35	1,88%	2,45%	2,53%	99,26%
	168	62	1,07%	1,68%	1,76%	99,26%
Stabicol						
	0	34	5,36%	5,36%	5,45%	99,11%
	24	127	2,78%	3,91%	4,17%	98,71%
	48	171	2,54%	3,62%	3,92%	98,67%
	72	189	2,27%	3,67%	3,91%	98,77%
	168	230	1,73%	3,22%	3,36%	99,55%

Tableau 6.22 Indice CBR moyen avec immersion en fonction du curage et du liant

Liant	Nombre d'heures de cure	CBR moyen (à 0,2" de pénétration)	W% finale moyenne		W% finale théorique moyenne	% de compaction moyen
			2,5 ^{er} cm	moyenne		
CSS-1						
	24	14	5,33%	5,44%	5,49%	99,02%
	48	25	3,61%	4,25%	4,33%	99,77%
	72	27	3,33%	4,00%	4,08%	98,87%
	96	32	2,90%	3,65%	3,89%	99,34%
	192	38	2,50%	3,14%	3,29%	99,32%
Stabicol						
	24	105			5,83%	98,56%
	48	155	3,82%	4,72%	5,25%	99,06%
	72	164	3,66%	4,81%	5,37%	98,31%
	96	178			5,10%	98,56%
	192	222	2,84%	4,05%	4,44%	98,63%

On remarque que le matériau stabilisé au Stabicol développe initialement (0 heure de curage témoin, c.-à-d. immédiatement après la compaction) un indice CBR accru. Ceci peut paraître surprenant, mais c'est en fait très logique. En effet, l'ajout d'émulsion diminue initialement et significativement l'indice CBR (comme la comparaison avec les résultats relatifs au matériau pulvérisé le démontre) par la diminution de la friction intergranulaire. En effet, avant le début du curage, seule la friction intergranulaire développe une réelle force de résistance à la pénétration. La friction est diminuée par la présence d'un film de bitume sur une bonne partie des granulats (surtout la partie fine). Or, il y a beaucoup moins (environ la moitié) de bitume ajouté lors d'une stabilisation au Stabicol que lors d'une stabilisation au CSS-1. Par conséquent, il est normal que l'indice CBR ne soit pas aussi affecté initialement par l'ajout de Stabicol que par l'ajout de CSS-1.

Par la suite, le matériau stabilisé au Stabicol développe un indice supérieur (>113) à celui du matériau pulvérisé en moins de 24 heures lorsque les conditions sont bonnes (étuve), et il développe un indice similaire (un peu inférieur) avec des conditions d'immersion. En s'appuyant strictement sur ces résultats, il serait possible d'affirmer qu'une stabilisation au Stabicol permet la pose du pavage le lendemain de la mise en place, et ce, peu importe la température durant la nuit. Les pertes par immersion d'indice CBR sont de 9% à 17% pour le matériau stabilisé au Stabicol. On note que l'indice CBR continue d'augmenter de façon importante pendant toute la durée de l'étude, et ce, même si la teneur en eau dans le matériau diminue et que l'hydratation du ciment en est probablement affectée. L'indice CBR final de 230 est relativement impressionnant.

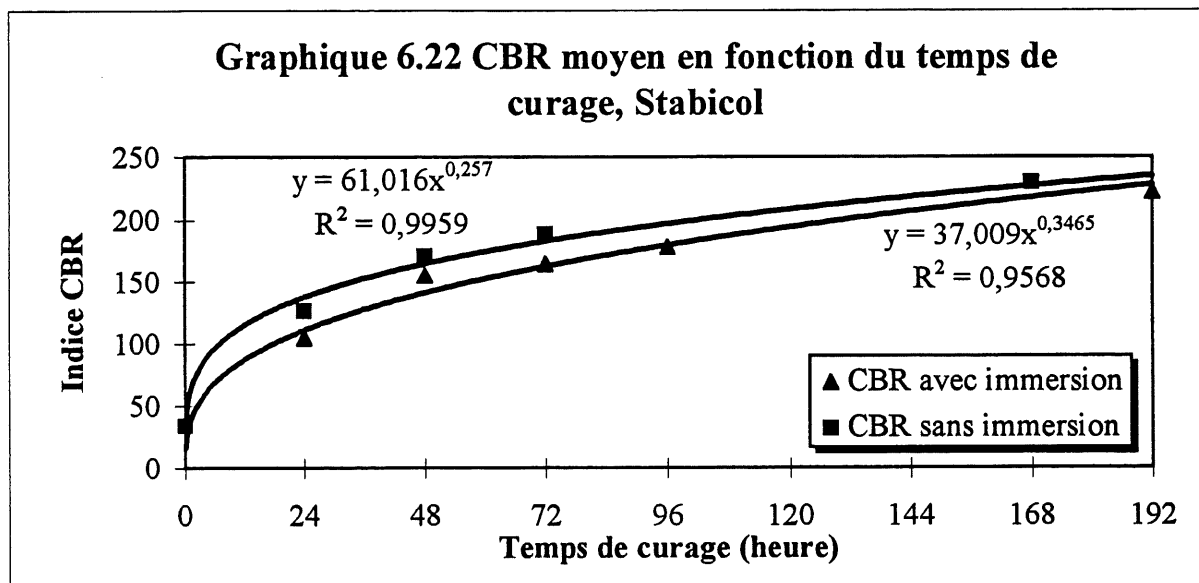
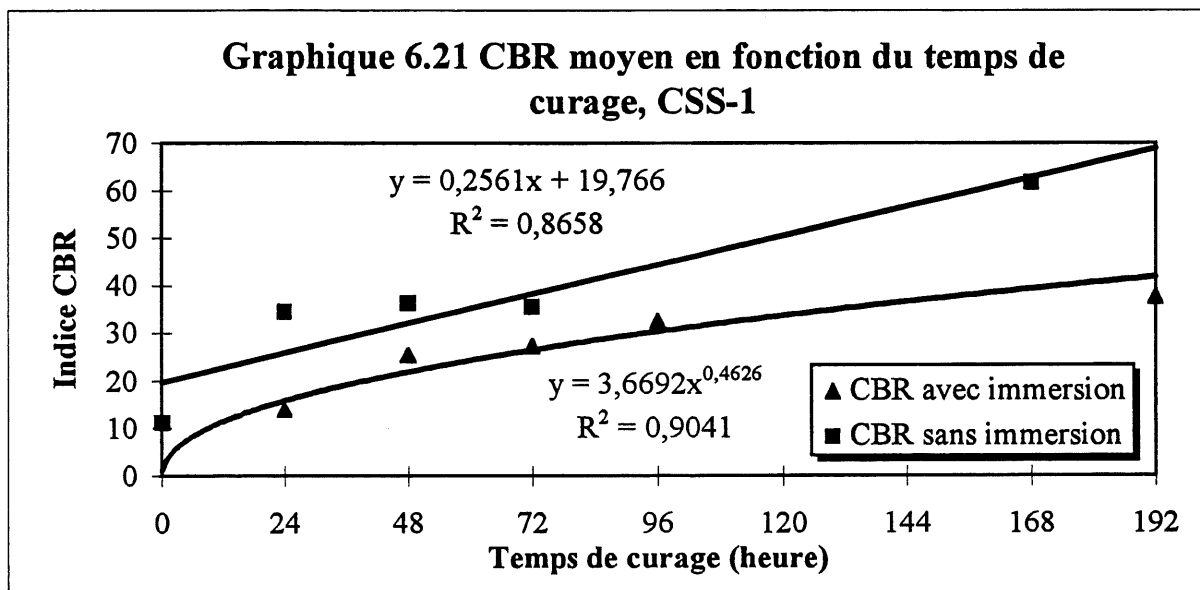
C'est très différent pour le matériau stabilisé au CSS-1. Tout d'abord la valeur initiale de son indice CBR est très faible (11). Ensuite, la croissance de l'indice CBR est modeste. Les 24 premières heures de cure lui permettent de tripler l'indice CBR, mais il demeure ensuite stable jusqu'à plus de 72 heures. Après une semaine (168 heures) son indice CBR équivaut à seulement 55% de celui du matériau pulvérisé. Ces résultats sont cohérents avec les recommandations des plus grandes administrations routières en France et aux États-Unis qui stipulent une période de cure d'au moins 14 jours pour les stabilisations à l'émulsion de bitume avant le recouvrement. Notons qu'à notre connaissance cette période de cure n'est pas souvent respectée (et n'est pas exigée) au Québec. Les pertes d'indice CBR avec immersion sont de l'ordre de 40% après une semaine de cure.

Les graphiques 6.21 et 6.22 illustrent ces résultats et donnent les équations des courbes de lissage effectuées en fonction du temps de cure. Trois des quatre régressions obtenues semblent relativement représentatives des résultats expérimentaux, mais le lissage relatif aux essais sans immersion avec le matériau stabilisé au CSS-1 ne donne pas un excellent résultat. En effet, aucun modèle simple ne permet d'estimer avec précision les résultats obtenus. Le lissage linéaire n'est pas, logiquement, le modèle idéal puisque l'on présume un ralentissement du taux (pente) de curage en fonction du temps. Il est cependant possible que ce ralentissement de la cure surviennent à plus de 7 jours pour le matériau stabilisé au CSS-1. Les modèles de type puissance associés aux autres groupes d'indices CBR semblent beaucoup plus appropriés. Il est possible d'ajouter à cette critique que même le modèle pour les résultats relatifs à l'essai CBR avec immersion pour le matériau stabilisé au CSS-1 est loin d'être parfait.

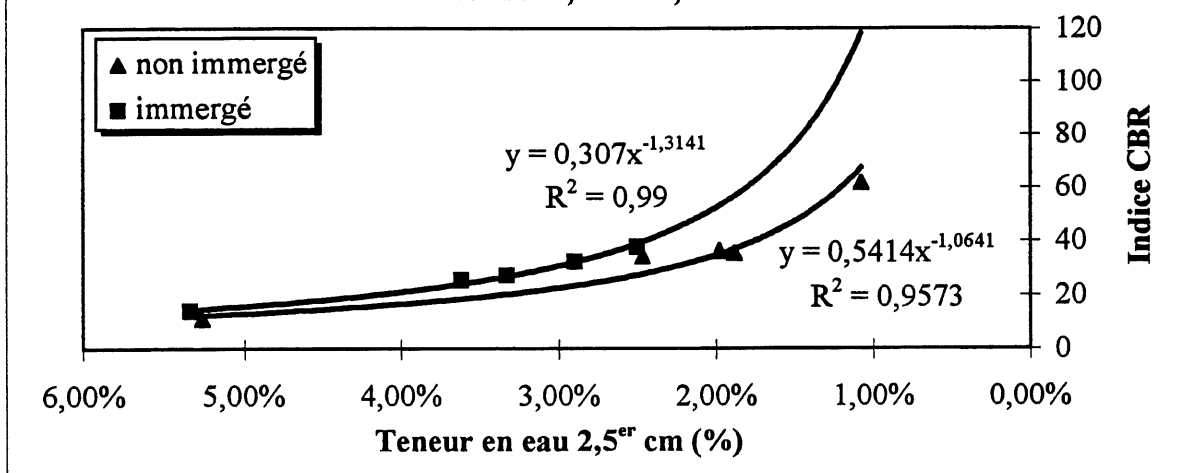
Les graphiques 6.23 et 6.24 présentent les mêmes résultats moyens, mais en fonction de la teneur en eau après essai du premier 2,5 cm de matériau. Il est bon de souligner qu'il y a toujours un certain degré d'incertitude ou d'imprécision sur ce type de teneur en eau, car il est impossible de prélever exactement les 2,5^{er} cm de matériau. La marge d'erreur à cet égard est facilement de 0,5 cm (la marge d'erreur sur la teneur en eau est difficile à estimer). De plus, le prélèvement ne s'effectuait pas de la même façon pour les deux matériaux. En effet, le matériau stabilisé au Stabicol semblait s'effriter (redevenir un granulat) lorsqu'on tentait de le démouler par impact, alors que le matériau stabilisé au CSS-1 était assez ductile pour permettre son démoulage quasiment en une seule pièce. Les résultats des essais après immersion sont inclus à titre indicatif, car il y a beaucoup de facteurs (absorption lors de l'immersion, désorption lors de l'essai) qui influencent la teneur en eau du 2,5^{er} cm avec ce type d'expérimentation.

On remarque sur le graphique 6.23 que l'indice CBR relatif au matériau stabilisé au CSS-1 suit un comportement beaucoup plus régulier en fonction de la teneur en eau qu'en fonction du temps (graphique 6.21). Les régressions de type puissance effectuées semblent assez représentatives des résultats obtenus. En réfléchissant aux résultats des graphiques 6.21 et 6.23, il semble que l'indice CBR (et possiblement la portance et la résistance mécanique) du matériau stabilisé au CSS-1 est beaucoup plus influencé à court terme par la teneur en eau du matériau (ou indirectement

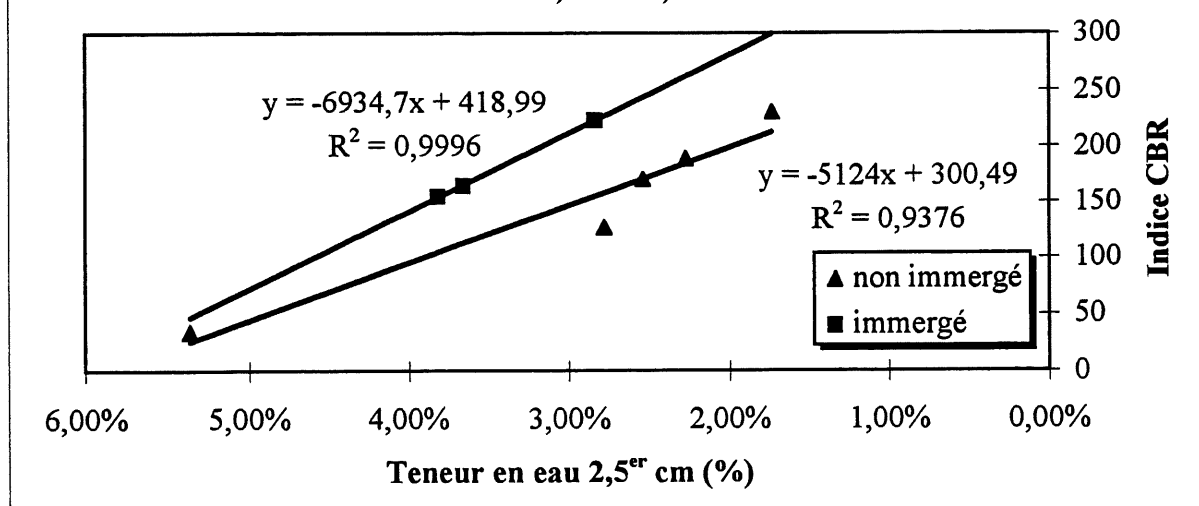
l'évaporation) que par le temps. Avec l'essai Marshall, il a cependant été démontré *qu'après* avoir atteint une teneur en eau relativement faible, la cure de ce matériau se poursuit en fonction du temps. Certaines études de terrain appuient ces derniers résultats [AMIRI et coll., 1994] [WIJK VAN, 1984].



Graphique 6.23 Indice CBR en fonction de la teneur en eau du 2,5^{er} cm, CSS-1



Graphique 6.24 Indice CBR en fonction de la teneur en eau du 2,5^{er} cm, Stabicol



À l'inverse, le matériau stabilisé au Stabicol semble avoir un comportement moins régulier en fonction de la teneur en eau du 2,5^{er} cm qu'en fonction du temps. Il faut avouer que la plage de teneur en eau est moins importante que pour le matériau stabilisé au CSS-1, et que cette dernière n'est pas nécessairement représentative de la teneur en eau libre dans le matériau. En effet, il est remarquable que, malgré l'hydratation du ciment, la teneur en eau, pour des temps et des conditions identiques de curage, demeure plus élevée qu'avec le matériau stabilisé au CSS-1. À

cet égard, l'hypothèse d'une rétention d'eau due à un phénomène d'adsorption de celle-ci par le ciment et les produits d'hydratation a été émise (pour plus d'information voir section 7.3). Du point de vue du bitume contenu dans le Stabicol, la portion d'eau adsorbée par le ciment serait à toute fin pratique comme de l'eau évaporée puisqu'elle ne serait plus en contact direct avec lui. En conséquence, présenter l'indice CBR relatif au matériau stabilisé au Stabicol en fonction de la teneur en eau ne voudrait possiblement pas dire grand chose. Néanmoins, il semble à lumière des graphiques 6.22 et 6.24 que l'indice CBR (et probablement la portance et la résistance mécanique) du matériau stabilisé au Stabicol soit davantage influencé par le facteur temps que par la teneur en eau, et ce même à très jeune âge.

Analyse statistique des résultats

Lors de l'étude des indices CBR en fonction du pourcentage de compaction, la variation dans les résultats avait été un problème afin de présenter des équations de comportement valables. Néanmoins, si l'on considère qu'il n'y a pas de relation évidente (relation très faible) entre l'indice CBR et le degré de compaction, les écarts-types obtenus ne sont pas nécessairement démesurés. Par exemple, on obtient des écarts-types de 2,8 et 14,8 pour les essais sans immersion pour les matériaux stabilisés au CSS-1 et au Stabicol respectivement. Ces valeurs sont respectables à l'égard des moyennes obtenues (22,7 et 138,8). Il serait inacceptable d'effectuer notre analyse statistique sur ces résultats. En effet, ces derniers ont été obtenus avec une masse volumique variable et il serait inadmissible d'inclure cette variation dans cette analyse. Les résultats de l'étude de curage seront donc employés. Ainsi il sera possible d'utiliser le même indicateur de précision (le pourcentage d'erreur potentiel maximal). Les hypothèses statistiques seront les mêmes. Le tableau 6.23 présente les résultats de cette analyse statistique.

À des valeurs très faibles, les pourcentages d'erreurs potentiels sont assez élevés; mais, ces valeurs ne nous intéressent pas beaucoup. À partir d'une valeur moyenne d'environ 30, les pourcentages d'erreur potentiels sont semblables, sinon inférieurs, à ceux observés avec l'essai Marshall pour des conditions d'analyse statistique identiques. Par conséquent, force est d'admettre que, statistiquement, l'essai CBR donne des résultats consistants avec les matériaux recyclés stabilisés.

Tableau 6.23 Analyse statistique des résultats à l'essai CBR
étude de curage

Liant	Nombre d'heure de cure	Immergé ou Non immergé	Valeur moyenne CBR	Écart- type CBR	Intervalle de confiance	% d'erreur potentiel maximal
CSS-1						
	0	I	11,2	3,11	±2,96	26,4%
	24	I	34,3	3,50	±3,33	9,7%
		N	14,0	1,35	±1,28	9,2%
	48	I	36,2	2,21	±2,10	5,8%
		N	25,4	5,29	±5,02	19,7%
	72	I	35,5	4,29	±4,07	11,5%
		N	27,2	4,94	±4,69	17,2%
	96	N	32,4	3,40	±3,23	10,0%
	168	I	61,6	3,41	±3,97	6,4%
	192	N	37,6	4,29	±4,07	10,8%
Stabicol						
	0	I	34,2	4,37	±4,15	12,1%
	24	I	126,8	16,60	±15,77	12,4%
		N	104,7	8,08	±7,68	7,3%
	48	I	170,5	16,04	±15,23	8,9%
		N	155,0	4,36	±4,14	2,7%
	72	I	188,5	7,56	±7,18	3,8%
		N	164,3	4,16	±3,95	2,4%
	96	N	178,3	12,50	±11,87	6,7%
	168	I	229,4	8,64	±10,05	4,4%
	192	N	222,3	7,56	±7,18	3,2%

Discussion sur l'applicabilité de l'essai CBR avec les matériaux recyclés stabilisés

Comme il a été démontré du point de vue statistique, l'essai CBR ne présente pas de problème. Du point de vue technique, certaines procédures, pour la compaction notamment, ont dû être adaptées, mais dans l'ensemble il n'y a pas eu de difficultés majeures.

La nécessité d'un certain curage pose cependant une certaine problématique d'ordre pratique. En effet, en tout, dix moules différents furent utilisés sur une période d'environ quatre mois (2 mois avec 5 moules et 2 mois avec 10 moules) afin d'accomplir l'ensemble des essais. L'utilisation de l'étuve pour le curage sur de longues périodes à 38°C restreindrait l'utilisation de celle-ci à cette seule fonction. Par conséquent, les moyens que nécessite une telle entreprise sont assez importants. De plus, il est clair que la période de curage utilisée n'était pas suffisante pour permettre d'atteindre le maximum de portance, surtout pour le matériau stabilisé au CSS-1, mais aussi pour celui stabilisé au Stabicol. Dans ces conditions, une étude complète (atteinte du maximum de portance) sur le curage demanderait vraisemblablement plusieurs mois. Cependant, les résultats d'une telle étude seraient sans aucun doute des plus intéressants.

Les résultats obtenus de l'indice CBR en fonction de la variation du niveau de compaction ne sont visiblement pas ceux que nous avons présumés. En effet, les comportements observés n'étaient pas prononcés et la qualité des équations de régression était relativement faible. Il faut toutefois avouer que la tendance observée semble adéquate et que l'on ne peut pas, dans ces conditions, porter un jugement négatif à l'égard de l'applicabilité de l'essai avec les matériaux recyclés stabilisés. Cependant, ce type d'étude n'est véritablement intéressant que dans un cadre de recherche. En pratique, les intervenants recherchent la valeur de modules pour des conditions optimales. À cet égard, l'étude sur le curage a permis d'obtenir des indices CBR logiques et crédibles en fonction des connaissances actuelles. Afin de statuer sur l'applicabilité (théorique) de l'essai CBR, il faudrait mener une étude parallèle entre ce dernier et des résultats de modules obtenus par un appareil triaxial à chargement cyclique. Ainsi, il serait possible de percevoir ou non une relation entre les deux. Néanmoins, il serait surprenant de trouver une corrélation juste et précise pour l'ensemble (ou la majorité) des matériaux recyclés stabilisés. En effet, les corrélations déjà présentées dans la littérature pour des sols, comme celle de Heukelom et Klomp (1962) ($M_R(\text{psi}) = 1500 \text{ CBR}$) [HUANG, 1993] donne des résultats très peu précis (facteur d'erreur d'au

moins deux). De plus, elles sont en général plus précises avec des sols fins et/ou peu portants, alors que les matériaux recyclés stabilisés sont fabriqués à partir de sols pulvérulents (granulat 0-20 mm).

6.6 Étude de gel-dégel

6.6.1 Objet et contexte d'étude

L'objectif de toute étude de gel-dégel est bien sûr d'estimer la sensibilité d'un matériau soumis à des cycles de gel-dégel selon certaines conditions environnementales. Les deux matériaux étudiés ont subi un nombre variable de cycle de gel-dégel dans l'air, c.-à-d. non immergés, et aussi sous condition saturée immergée. Il est bon de noter que les échantillons dans l'air n'étaient pas nécessairement secs, mais possédaient plutôt une teneur en eau qui devait varier un peu selon l'humidité présente dans l'appareil de gel-dégel. Pour plus d'information sur la procédure d'essai, se référer à la section 4.3.6. L'indicateur choisi pour estimer la sensibilité de ces matériaux aux cycles de gel-dégel est la stabilité Marshall.

6.6.2 Présentation et analyse des résultats

Le tableau 6.24 présente la moyenne des stabilités Marshall obtenues en fonction du conditionnement des briquettes et du liant utilisé pour la stabilisation. Il permet également de connaître la teneur en eau des échantillons lors des essais. Ces moyennes sont calculées à partir de trois résultats. L'ensemble des résultats est présenté en annexe à la section correspondante.

Il est important de souligner certaines différences entre les briquettes utilisées pour cette étude et celles utilisées pour les autres essais (Marshall, Brésilien et compression simple). La masse de granulats était plus importante (50 grammes de plus) pour les briquettes fabriquées pour l'étude de gel-dégel. Ceci se traduit par une augmentation d'environ 3 mm au niveau de l'épaisseur des briquettes et par une légère diminution du pourcentage de compaction (environ 99% versus

100%). De plus, le curage ne s'est pas effectué sous pellicule plastique, mais sous température et humidité contrôlées. Pour plus d'informations voir la section 4.3.6.

Sans analyser dans les détails les teneurs en eau observées, il est bon de souligner que la teneur en eau varie différemment selon le type de stabilisant (pour des conditions identiques d'exposition). De plus, l'augmentation importante de la teneur en eau des briquettes saturées immergées stabilisées au CSS-1 résulte d'un gonflement des briquettes (environ 4 mm en épaisseur et 4 mm en diamètre).

En premier lieu, soulignons l'augmentation peu prévisible de stabilité Marshall témoin après dix cycles pour les deux matériaux. Cette augmentation est de l'ordre de 17% et 45% pour les matériaux stabilisés au CSS-1 et au Stabicol respectivement. Ce comportement est relativement surprenant, mais ce phénomène a également été observé dans une étude de gel-dégel (avec les mêmes liants) réalisée au MTQ [BEAUDOIN et coll., 1994]. Loisel [LOISEL, 1994] n'a pas noté ce comportement avec une stabilisation au CSS-1, par contre sa procédure d'essai ne lui permettait pas d'identifier ce phénomène directement. Ce comportement est également présent dans certains résultats rapportés par Favretti [FAVRETTI, 1994], malgré une cure prolongée de plus de 3 mois avant le début des cycles de gel-dégel.

Par la suite, la stabilité Marshall diminue progressivement en fonction des cycles de gel-dégel. Cette diminution est de 13% et 8% après 50 cycles (par rapport à la valeur de stabilité pour 10 cycles) pour les matériaux stabilisés au CSS-1 et Stabicol respectivement. Notons finalement que la stabilité témoin pour le matériau stabilisé au Stabicol est encore supérieure après 50 cycles de gel-dégel à la valeur de référence à 78 jours de cure dans la chambre à température et humidité contrôlées.

Dans une condition de saturation immersion, les briquettes se comportent très différemment. Il faut spécifier que ces conditions d'essais étaient extrêmement sévères, car on se contente généralement, dans ce type d'étude, d'une simple immersion. Les briquettes stabilisées au CSS-1 ont tout de même résisté au programme d'essai. Après 50 cycles cependant, leur état était

lamentable et elles n'auraient sûrement pas résisté à une autre série de 50 cycles. La baisse de stabilité atteint 81% après 50 cycles, elle est déjà de 49% après 10 cycles.

Tableau 6.24 Résultats moyens de stabilité Marshall en fonction du liant et du nombre de cycles de gel-dégel

Liant	Curage et Nombre de cycle	Témoin		Saturée immergée	
		Stabilité (N)	W%	Stabilité (N)	W%
CSS-1					
	0 cycle (28 jours)	18515	0,77%	12323	5,64%
	10 cycles	21723	0,50%	6238	7,34%
	20 cycles	20798	0,52%	3750	8,99%
	30 cycles	20459	0,48%	3818	8,83%
	50 cycles	18979	0,48%	2306	9,88%
Stabicol					
	0 cycle (28 jours)	26462	0,67%	14655	6,22%
	10 cycles	38285	0,67%	ruine	
	20 cycles	38859	0,67%	ruine	
	30 cycles	36328	0,70%	ruine	
	50 cycles	35300	0,82%	ruine	
Stabicol					
	0 cycle (78 jours)	34218	0,58%	15990	6,13%

Favretti [FAVRETTI, 1994] a utilisé la même technique que nous lors de son étude de gel-dégel sur plusieurs matériaux stabilisés avec des liants hydrocarbonés (plusieurs émulsions, bitume mousse), c.-à-d. que ces échantillons ont subi, comme les nôtres, une saturation et une immersion

avant et pendant les cycles de gel-dégel (Favretti appliquait une saturation entre chaque cycle de gel-dégel). Ses résultats dénotent, comme pour les nôtres avec le matériau stabilisé au CSS-1, une forte baisse dans les premiers (après les 3 ou 4 premiers cycles) cycles de gel-dégel. Après quinze ou vingt cycles (selon le matériau), la diminution de résistance était beaucoup moins marquée (plateau de résistance). Son étude permettait d'obtenir des résultats jusqu'à 60 cycles de gel-dégel. Nos résultats illustrent également ce plateau de résistance pour la portion entre 20 et 30 cycles, mais finalement la dégradation des échantillons semble se poursuivre et la résistance diminue de nouveau. Il faut noter que la cure des briquettes de Favretti, avant l'application des cycles de gel-dégel, était très importante (plus de 3 mois) et que ce facteur a possiblement une influence sur la résistance après plusieurs cycles de gel-dégel.

Après dix cycles de gel-dégel dans ces conditions sévères, le matériau au Stabicol ne démontrait plus aucune cohésion. Les briquettes se détruisaient au simple toucher. Après 30 cycles, celles-ci étaient complètement désagrégées. Notons finalement que l'étude réalisée au MTQ [BEAUDOIN et coll., 1994], utilisant une simple immersion et un autre granulat, indiquait une baisse plus importante de la stabilité pour le matériau stabilisé au Stabicol (sans toutefois provoquer la ruine des briquettes) que pour celui stabilisé au CSS-1.

6.6.3 Discussion

Les conditions d'essais pour cette étude étaient quelques peu particulières, car il n'y a pour l'instant aucune procédure normalisée de ce type d'essai avec les matériaux stabilisés. L'appareillage utilisé était cependant très performant et les conditions d'exposition ont été bien contrôlées. Il apparaît évident, suite aux résultats présentés, qu'une étude complète et très détaillée s'impose avec les liants mixtes. En effet, les résultats obtenus sont inquiétants, principalement pour des chaussées où le drainage est déficient et/ou la nappe phréatique est près de la surface. Dans ces conditions, les matériaux stabilisés (même s'ils sont situés dans la couche supérieure de la chaussée) peuvent potentiellement subir des cycles de gel-dégel dans un état semi-saturée ou saturée. Les conséquences des cycles de gel-dégel durant un seul hiver dans ce genre de conditions pourraient alors être catastrophiques et provoquer une dégradation rapide de

la chaussée. Cependant, l'essai effectué est de toute évidence très sévère et les conditions imposées ne sont probablement jamais atteintes dans la réalité.

Une étude subséquente pourrait à la fois dégager, plus précisément, les conditions limites pour les matériaux stabilisés de façon mixte face aux cycles de gel-dégel, et cerner les paramètres qui permettraient possiblement de diminuer la sensibilité de ces matériaux face à ces conditions. D'autre part, aucune étude jusqu'à maintenant ne s'est intéressée à la sensibilité de ces matériaux (stabilisés avec liant mixte) aux sels de déverglaçage. En effet, il est connu que les liants hydrauliques sont affectés par la présence de ces sels et la fissuration de surface risque de les laisser passer jusqu'à la structure du matériau recyclé stabilisé.

6.7 Conclusion sur les essais de caractérisation mécanique

Les performances mécaniques du matériau stabilisé au Stabicol sont, sans conteste, nettement supérieures à celles obtenues pour le matériau stabilisé au CSS-1. Plus spécifiquement, on note pour le matériau stabilisé au Stabicol et pour une condition témoin et après saturation respectivement, et à 100% de compaction:

- des stabilités Marshall (cure normalisée) équivalentes à 170% et 249% de celles obtenues avec le matériau stabilisé au CSS-1
- des stabilités Marshall pour une cure normalisée + 27 jours équivalentes à 208% et 262% de celles obtenues avec le matériau stabilisé au CSS-1
- des résistances en tension équivalentes à 163% et 241% de celles obtenues avec le matériau stabilisé au CSS-1
- des résistances en compression simple équivalentes à 213% et 285% de celles obtenues avec le matériau stabilisé au CSS-1.

Il est cependant bon de souligner qu'une résistance en tension supérieure n'est possiblement pas un atout pour cette classe de matériaux.

Les études sur le curage ont démontré que le matériau stabilisé au Stabicol avait un taux de cure nettement supérieur à celui stabilisé au CSS-1. De plus, la cure à jeune âge du matériau stabilisé au Stabicol ne semble pas être très influencé par la teneur en eau et/ou l'évaporation. Vis-à-vis de ces deux constatations, le matériau stabilisé au Stabicol peut vraisemblablement être recouvert par le pavage au lendemain de l'étape de stabilisation. La cure à jeune âge du matériau stabilisé au CSS-1 semble être en premier lieu influencée par la teneur en eau et/ou l'évaporation. Par la suite, ce matériau continue de curer pendant plus d'un mois même si le taux d'évaporation est nul (seulement avec le temps). L'étude de curage réalisée avec l'essai CBR semble indiquer qu'une cure avant recouvrement de 7 jours n'est possiblement pas suffisante pour un matériau stabilisé au CSS-1. Il faut cependant avouer que cette hypothèse est construite sur les résultats d'un essai (CBR) dont l'applicabilité avec ces matériaux n'est pas démontrée. De plus, les conditions météorologiques de chantier peuvent permettre une plus grande évaporation que celle obtenue dans l'étuve (grâce au vent et au soleil). Néanmoins, une cure avant recouvrement de 14 jours (comme il est souvent prescrit dans les devis en France), durant laquelle la circulation lourde serait défendue, devrait être envisagée lors des réfections utilisant ce type de matériau de façon à éviter le plus possible les dégradations à jeune âge de la fondation.

Le matériau stabilisé au Stabicol a cependant démontré des signes évidents de faiblesse à l'égard des cycles de gel-dégel. En effet, ce matériau n'a pas su résister aux cycles de gel-dégel dans une condition saturée immergée. Une autre étude menée par le MTQ indique également qu'un matériau stabilisé au Stabicol semble plus sensible aux cycles de gel-dégel sous immersion qu'un matériau stabilisé au CSS-1.

Les résistances mécaniques des deux matériaux semblent très influencées par le niveau de compaction. En effet, on note que la stabilité Marshall pour 100% de compaction est plus que le double de celle obtenue pour 95% de compaction, et ce pour toutes conditions d'essais réalisées. D'autre part, l'indice de portance CBR n'abonde pas dans ce sens avec la même proportion. En effet, les variations de l'indice CBR en fonction du pourcentage de compaction étaient moins prononcées que la Stabilité Marshall. Par exemple, on note une baisse de seulement 18% et 10% de l'indice CBR, lorsque le pourcentage de compaction passe de 100% à 95%, pour le matériau

stabilisé au CSS-1 et au Stabicol respectivement pour une condition d'essai sans immersion. Naturellement, il y a une différence importante entre le mode de sollicitation de l'essai Marshall et celui de l'essai CBR. Une comparaison directe entre ces deux paramètres est donc peu rigoureuse.

L'essai Marshall s'est encore une fois avéré très efficace pour caractériser les matériaux recyclés stabilisés. En effet, les résultats obtenus avec cet essai sont cohérents et les régressions effectuées avec ceux-ci sont de très haute qualité.

L'essai Brésilien a permis d'obtenir des résultats crédibles, et ce d'autant plus que la presse utilisée n'était pas d'une très haute précision (à l'égard des valeurs obtenues). Cette étude a permis d'obtenir certaines indications intéressantes, telle l'influence de la saturation sur les liens formés par les liants, mais la pertinence de caractériser les matériaux recyclés stabilisés en fonction de leur résistance en tension est discutable.

L'essai de compression simple n'a pas très bien performé. Cependant, il est fort possible que les dimensions des échantillons (briques Marshall) utilisés pour cet essai soient en grande partie responsables de cette piètre performance. L'essai de compression simple est tellement utilisé en génie civil, et sa réalisation si simple, qu'une étude utilisant des échantillons de dimensions plus importantes et de forme cylindrique ayant un rapport longueur/diamètre proche de 2 serait nécessaire avant de rejeter l'applicabilité de cet essai avec les matériaux recyclés stabilisés. À cet égard, il serait intéressant d'appliquer directement ou indirectement la procédure d'essai de compression Duriez, car cette dernière est utilisée en France dans la caractérisation des graves-émulsions [RÉGIS, 1985]. Par conséquent, la base de référence est déjà relativement développée.

L'applicabilité de l'essai CBR n'a pas été démontrée, mais elle n'a pas été rejetée. Afin de statuer véritablement sur cette question, un programme d'étude demandant beaucoup de temps et de moyens serait nécessaire. Présentement, la validité de cet essai avec les sols est de plus en plus mise en doute. Néanmoins, on ne peut, d'un simple revers de la main, annuler une base de comparaison aussi importante que celle reliée à l'indice CBR. La réalisation de cet essai avec les matériaux recyclés stabilisés est peu pratique, car ces matériaux demandent un temps de cure et les échantillons CBR doivent demeurer dans leur moule jusqu'à la fin de la procédure d'essai.

L'application à grande échelle de cet essai dans le cadre du contrôle des matériaux recyclés stabilisés n'est donc pas conseillée. Toutefois, cet essai peut potentiellement être utilisé avec succès dans un contexte de recherche, d'autant plus que l'obtention de valeurs types à très long terme (6 mois et un an) de l'indice CBR serait très intéressante.

Chapitre 7. Investigations diverses

7.0 Introduction

Plusieurs expérimentations ont été réalisées sur les deux matériaux étudiés qui n'ont pas trait à la caractérisation des propriétés mécaniques de ceux-ci. De plus, certaines procédures de calcul et une critique portant sur la réalisation d'un essai avec les matériaux étudiés s'inséraient plutôt mal à l'intérieur des chapitres précédents. Il a donc été décidé de regrouper ensemble ces diverses présentations dans un chapitre distinct.

Ce chapitre présentera, en premier lieu, les résultats des études ne portant pas sur la caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux recyclés stabilisés. Plus spécifiquement, il sera traité des résultats d'une étude d'extraction de bitume avec les liants mixtes, d'une étude de perméabilité sur les matériaux recyclés stabilisés et d'une étude sur la teneur en eau après curage.

En deuxième lieu, ce chapitre présentera la critique (appuyée par des résultats de laboratoire et une étude spécifique) de l'utilisation de l'essai de densité brute (BNQ 2300-040) pour calculer la masse volumique des matériaux recyclés stabilisés.

Finalement, ce chapitre présentera la méthode statistique employée pour estimer l'écart de stabilité Marshall entre l'utilisation de la presse Baldwin et de la presse normalisée (qui a permis de corriger les résultats obtenus avec la presse Baldwin).

7.1 Étude d'extraction de bitume avec liant mixte

7.1.1 Objectif général de l'étude

Afin de vérifier le pourcentage de liant d'ajout en chantier des matériaux recyclés stabilisés, des échantillons sont généralement prélevés lors de la stabilisation du matériau et des essais d'extraction de bitume sont effectués sur ceux-ci pour déterminer leur contenu en bitume total. Des échantillons du matériau pulvérisé (et non stabilisé) ayant préalablement subi le même traitement, le pourcentage de bitume résiduel dans le granulat recyclé est donc connu. Par la simple différence des résultats il est alors possible de connaître la teneur réelle en liant d'ajout, et ainsi contrôler la qualité du matériau produit en fonction du pourcentage de liant visé.

Lors d'une stabilisation à l'aide d'un liant mixte bitume-ciment on n'effectue pas d'essais d'extraction de bitume sur le matériau stabilisé, car on présume une influence du ciment sur le résultat de l'essai. Les avis sont cependant partagés sur ce point. En effet, il est possible, sinon probable, que le ciment ait une influence sur le résultat, mais cette influence est-elle significative? Si oui, le problème est-il incontournable? L'objectif de cette étude est de vérifier si l'hydratation du ciment nuit réellement à la précision de l'essai d'extraction du bitume dans le cas d'une stabilisation mixte (avec le liant Stabicol); ceci dans le but global d'évaluer si cet essai peut être envisagé pour contrôler efficacement le taux d'épandage d'un liant mixte, tel le Stabicol, en chantier.

7.1.2 Hypothèses et objectifs spécifiques de l'étude

L'objectif général de l'étude est de vérifier l'influence de la présence de ciment sur le résultat de l'essai d'extraction. Il a été assumé a priori qu'il y avait une variation de cette influence en fonction de l'hydratation du ciment, c.-à-d. en fonction du temps et des conditions environnementales de curage. Des essais ont donc été effectués sur des mélanges stabilisés au Stabicol à très faible curage et d'autres ayant subi un curage de 14 jours (pour les conditions de curage voir section 4.4.1). Afin d'estimer l'erreur imputable à l'essai et pour vérifier l'hypothèse que seule la présence

de ciment augmente "l'erreur" de l'essai, des essais d'extraction ont été réalisés sur des mélanges stabilisés au CSS-1 ayant subi les mêmes conditions de curage que ceux stabilisés au Stabicol. Selon cette approche, il est possible d'estimer l'influence à court et à moyen termes de la présence de ciment sur le résultat de l'essai d'extraction.

7.1.3 Présentation et analyse des résultats

Le tableau 7.1 présente les résultats obtenus lors des essais d'extraction de bitume sur les différents mélanges stabilisés au CSS-1 et au Stabicol. Le premier essai d'extraction sur un mélange sans curage du matériau stabilisé au CSS-1 a été éliminé, car un bris d'équipement nous a fait perdre beaucoup de bitume et, par conséquent, le résultat a été jugé non représentatif.

Comme il est possible de le déduire du tableau 7.1, l'imprécision de l'essai d'extraction a été de l'ordre de 0,25% en valeur absolue pour les mélanges stabilisés au CSS-1, alors qu'elle a été d'environ 0,17% pour celui stabilisé au Stabicol pour une condition d'essai sans curage. Cette différence n'indique cependant pas que le ciment a amélioré la précision de l'essai. En effet, la marge d'erreur de l'essai d'extraction est fonction principalement du granulat utilisé et de la teneur en bitume du mélange. Puisqu'il y avait moins de bitume dans le matériau stabilisé au Stabicol que dans celui au CSS-1, il est normal que la précision de l'essai en valeur absolue soit légèrement inférieure pour ce dernier. Toutefois, nous pouvons souligner qu'à jeune âge, l'essai d'extraction avec le matériau stabilisé au Stabicol a donné des résultats très satisfaisants, et que le ciment ne semble pas avoir d'influence significative sur les résultats de l'essai à ce stade d'hydratation.

Cependant, si un tel résultat était utilisé directement, c.-à-d. sans correction pour la justesse de l'essai, afin de calculer le pourcentage de Stabicol ajouté lors d'une stabilisation, nous trouverions:

$$\begin{aligned} &1,53 \text{ (\% de bitume moyen lors de l'essai)} + \\ &(1,53/0,9) \text{ (\% de ciment en fonction du \% de bitume)} = \\ &3,24\% \text{ de liant bitume+ciment d'ajout.} \end{aligned}$$

En réalité 3,6% de liant a été ajouté, donc l'erreur en valeur absolue sur le *liant d'ajout* est de 0,36% alors que l'erreur obtenue pour la stabilisation au CSS-1 est de 0,25% (selon les résultats obtenus). Par conséquent, même si l'erreur (à jeune âge) concernant le pourcentage de bitume dans le matériau stabilisé au Stabicol est moindre que celle obtenue pour celui stabilisé au CSS-1, on obtient un écart plus important au niveau du liant d'ajout entre la teneur réelle et la teneur calculée.

Tableau 7.1 Résultats des essais d'extraction de bitume

Type de liant	Curage	Résultats (%) (1)	Teneur (%) en bitume réelle (2)	Écart (2)-(1)	Écart entre aucun curage et 14 jours de cure
CSS-1					
	Aucun	essai rejeté	3,6		
	Aucun	3,32	3,6	0,28	
	Aucun	3,38	3,6	0,22	
CSS-1					0,02
	14 jours	3,34	3,6	0,26	
	14 jours	3,36	3,6	0,24	
	14 jours	3,29	3,6	0,31	
Stabicol					
	Aucun	1,51	1,705	0,195	
	Aucun	1,61	1,705	0,095	
	Aucun	1,48	1,705	0,225	
Stabicol					0,15
	14 jours	1,31	1,705	0,395	
	14 jours	1,45	1,705	0,255	
	14 jours	1,37	1,705	0,335	

Les résultats obtenus sur les matériaux curés pendant 14 jours indiquent clairement que cette période de curage n'a pas influencé le résultat moyen du matériau stabilisé à l'émulsion CSS-1. En effet, l'écart de 0,02% en valeur absolue est évidemment relié à la variation dans les résultats de l'essai et non à une véritable différence entre ceux-ci. Par contre, en émettant l'hypothèse d'une distribution normale des résultats, il est facile de démontrer avec plus de 95% de confiance qu'il y

a une différence entre les résultats sans curage et ceux avec 14 jours de curage dans le cas du Stabicol.

Par conséquent, le ciment a réellement une influence significative sur le résultat de l'essai d'extraction de bitume en fonction de son hydratation. Il était d'ailleurs évident qu'un pourcentage significatif de bitume demeurait dans le granulat lors des tests à 14 jours de curage, car plusieurs taches foncées apparaissaient encore dans le granulat une fois l'essai terminé, soulignant la présence de bitume non extrait.

7.1.4 Recommandations

L'essai d'extraction de bitume pour contrôler le taux d'ajout de liant en chantier des matériaux recyclés stabilisés est très utile, mais sa précision est difficile à mesurer. En effet, d'une part il est quasi impossible, dans le contexte d'un matériau recyclé, d'établir le facteur de justesse relié à l'imprécision de l'essai comme c'est le cas pour les bétons bitumineux. D'autre part, la teneur en liant avant la stabilisation peut être relativement variable d'un échantillon à un autre (surtout si le matériau est pulvérisé en place). En dernier lieu, la teneur en liant d'ajout est aussi variable (surtout lorsque la stabilisation est réalisée en chantier). Alors dans ce contexte, il devient à la fois difficile de connaître la valeur moyenne du liant total (à cause de l'absence d'un facteur de justesse) et à la fois hasardeux de tenter de connaître la variation du liant d'ajout en chantier. Malgré cela, il est possible d'effectuer un contrôle satisfaisant avec cet essai pour les matériaux stabilisés à l'aide d'émulsions de bitume conventionnelles.

Cette étude démontre que l'influence du ciment à très jeune âge sur le résultat de l'essai d'extraction est relativement limitée (sinon inexistante). Cependant, il convient de souligner que le matériau prélevé se doit d'être séché très rapidement afin d'éviter le plus possible l'hydratation du ciment. Comme nous l'avons montré par un calcul simple, même si l'erreur de l'essai n'est pas augmentée à jeune âge, l'erreur sur le calcul de la teneur du liant (bitume + ciment) d'ajout est sensiblement plus élevée. D'autre part, si une contestation devait survenir, il serait impossible d'effectuer simplement l'essai d'extraction sur du matériau prélevé à même la fondation de la

chaussée (ou même dans des boîtes laissées dans un entrepôt), car le résultat alors obtenu ne serait pas valable en raison de l'hydratation déjà importante du ciment.

Toutefois, une question demeure: est-ce que le problème est incontournable? En effet, la majeure partie de l'erreur dans le résultat de cet essai provient du fait qu'il reste encore du bitume dans le granulat après l'extraction. Une petite portion de ce bitume est quasi impossible à extraire, mais l'autre peut être facilement extraite par un second essai d'extraction ou simplement par un lavage supplémentaire. Il serait donc possible d'améliorer la précision de l'essai en l'effectuant à deux reprises ou en modifiant la procédure (en réalisant des lavages supplémentaires au trichloréthylène), ceci tant avec une stabilisation à l'émulsion de bitume conventionnelle qu'avec un liant mixte. Néanmoins, ceci obligerait la présentation d'une procédure d'extraction de bitume spécifique aux matériaux recyclés stabilisés et/ou d'un ajout à la norme actuellement en vigueur.

7.2 Étude de perméabilité

7.2.1 Objet et contexte d'étude

Une des caractéristiques habituellement recherchées chez un matériau de fondation est une bonne capacité drainante. En effet, il est important qu'une chaussée soit bien drainée de façon à retenir le moins possible d'eau dans sa structure. De plus, il a été démontré que la saturation diminuait les capacités mécaniques des matériaux recyclés stabilisés. Par conséquent, il semble important que ces matériaux possèdent une perméabilité adéquate. Peu ou pas d'études ont produit des résultats de perméabilité pour des matériaux recyclés stabilisés. De plus, il apparaissait intéressant d'examiner l'influence du liant sur ce paramètre. C'est pourquoi il a été décidé d'effectuer quelques essais de perméabilité afin d'obtenir des valeurs types pour les deux matériaux recyclés stabilisés étudiés.

En tout, quatre essais ont été réalisés (deux pour chaque matériau étudié); pour de plus amples informations sur la procédure et la théorie entourant ces essais, le lecteur peut se référer à la section 4.4.2.

7.2.2 Présentation et analyse des résultats

Les tableaux 7.2 et 7.3 présentent les résultats des essais de perméabilité pour les matériaux stabilisés au CSS-1 et au Stabicol respectivement. Les graphiques 7.1 et 7.2 illustrent les résultats obtenus en fonction de la contre-pression appliquée.

Essai #1 sur matériau stabilisé au CSS-1

Sans application de contre-pression, la perméabilité diminue rapidement en fonction du temps. Cette observation est contraire à la théorie. En effet, normalement la perméabilité augmente avec la saturation du matériau. Par quoi est provoquée cette diminution ? On ne saurait dire. Pourrait-il y avoir une réaction entre le liant et l'eau, ou alors un colmatage par l'entraînement de particules fines? Cela pourrait expliquer une certaine décroissance de la perméabilité avec le temps. Ces hypothèses sont cependant peu probables, car les papiers-filtres ne démontraient aucune coloration particulière lors du démoulage. Le contact moule-matériau semblait très bon et aucune fissuration (chemin d'écoulement préférentiel) ne fut observée.

De plus, la valeur initiale est élevée, mais en pratique on tend à ne pas la prendre en compte, car elle pourrait provenir simplement d'une expulsion d'eau de l'échantillon sous la pression appliquée. Dans notre cas cette alternative semble pratiquement impossible, car la teneur en eau du matériau après la cure se situe sous les 2%.

Cependant, lors de l'application de la contre-pression, on note une augmentation de la perméabilité d'un ordre de grandeur. La perméabilité mesurée est alors d'environ $3E-5$ cm/sec. Ensuite, avec le temps et la montée en contre-pression, la perméabilité tend à diminuer légèrement. Cette diminution n'est toutefois pas très importante. La valeur finale de perméabilité est environ $1E-5$ cm/sec.

Essai #2 sur matériau stabilisé au CSS-1

Cet essai a été réalisé le dernier (quatrième). Après le premier essai, il a été jugé inutile de mesurer des perméabilités sans contre-pression, car, l'échantillon n'étant pas saturé, les valeurs données sont peu significatives. Les valeurs de perméabilité sous une contre-pression de 100 kPa n'ont pu

être mesurées à cause d'une mauvaise connexion. Ce problème fut cependant résolu et les valeurs de perméabilité à partir de 200 kPa de contre-pression sont fiables.

On constate une augmentation, claire même si limitée, de la perméabilité en fonction de la contre-pression. Les valeurs semblent se stabiliser pour les fortes contre-pressions (>500 kPa). Ce cheminement est tout à fait compatible avec la théorie de perméabilité sous contre-pression.

Les valeurs maximales et finales mesurées sont de l'ordre de $5E-5$ cm/s. Ces valeurs sont très voisines de la valeur maximale trouvée lors du premier essai avec le liant CSS-1 ($k = 3E-5$ cm/s). Avec le temps, comme dans tous les autres essais, on distingue une diminution de la perméabilité, sous une contre-pression constante (ceci est contraire à la théorie?).

Essai #1 sur matériau stabilisé au Stabicol

Quand la contre-pression augmente, la perméabilité tend d'abord à diminuer légèrement. Quand on regarde la variation de perméabilité en fonction de la contre-pression (graphique 7.2), on s'aperçoit que celle-ci augmente par la suite pour atteindre un maximum lors de l'application de la contre-pression de 500 kPa. Finalement, la perméabilité redescend. Ce comportement pourrait s'expliquer par la formation d'un chemin préférentiel qui, avec le temps, se serait refermé. En effet, la forte perméabilité semble être un phénomène transitoire. En fin d'essai, on ne distingue pas de fissures sur l'échantillon et aucune trace de colmatage sur les papiers-filtres n'est visible. De plus, le contact moule-matériau semble adéquat.

Doit-on prendre en compte cette forte perméabilité? On préconise plutôt d'adopter une valeur type de $1E-4$ cm/s, tout en sachant que cette valeur n'est qu'approximative. La perméabilité est de toute façon plus élevée que celle mesurée pour le matériau stabilisé au CSS-1.

Essai #2 sur matériau stabilisé au Stabicol

Lors du démoulage, on a émis des doutes sur le bon contact latéral moule-matériau. Ainsi, l'échantillon a été extrait très facilement : il glissait dans le moule. On n'entrevoyait cependant pas de passage préférentiel, comme des fissures sur la surface latérale de l'échantillon. Si l'on examine les valeurs de perméabilité trouvées, on constate que ces dernières varient peu. On décèle une

légère diminution de la perméabilité en cours d'essai, mais l'application de la contre-pression ne semble pas avoir de réelle influence. Cela tend à renforcer l'hypothèse d'écoulement latéral, d'autant plus que les valeurs de perméabilité avoisinent $1\text{E-}3$ cm/s, soit des valeurs très fortes si on les compare à celles obtenues lors du premier essai avec le liant Stabicol. Les résultats de cet essai ne seront donc pas pris en compte.

Valeurs types choisies

En résumé, on retiendra une valeur de perméabilité de 3 à $5\text{E-}5$ cm/s pour le matériau stabilisé au CSS-1 et une valeur plus forte de $1\text{E-}4$ cm/s pour le matériau stabilisé au Stabicol. Ces valeurs de perméabilité sont du même ordre de grandeur que celles observées pour une pierre concassée ayant une granulométrie semblable au granulat recyclé utilisé.

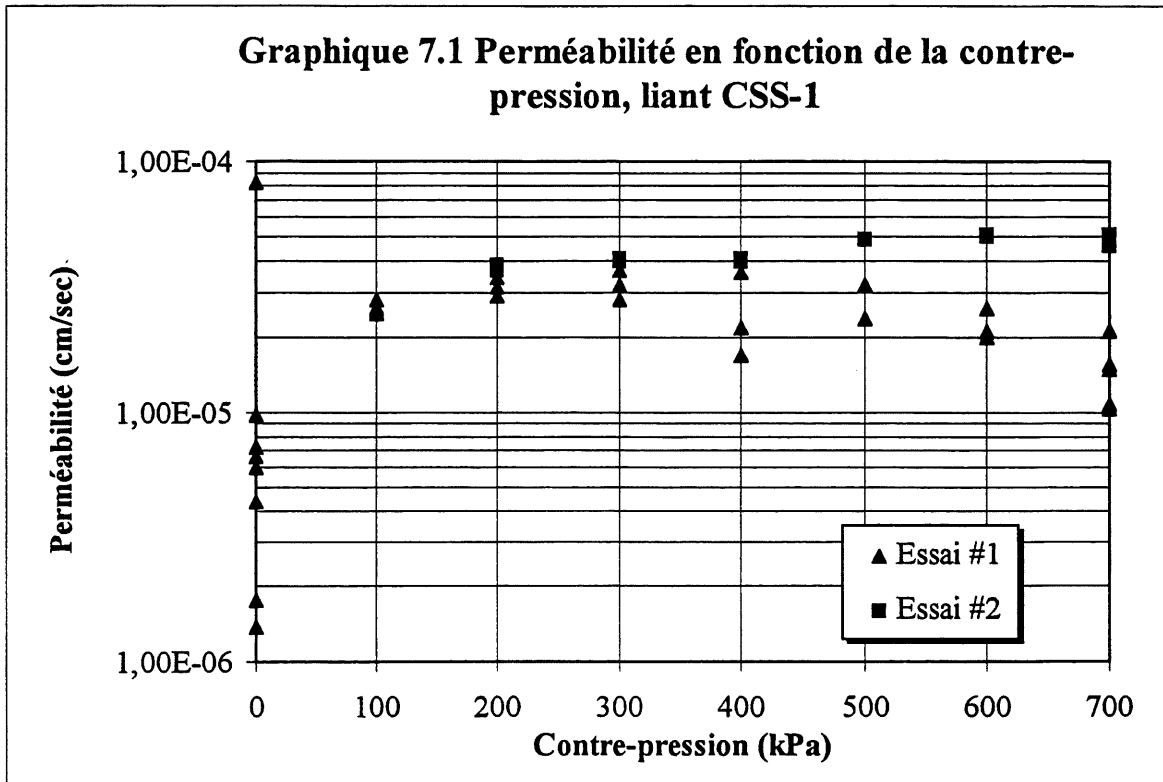
**Tableau 7.2 Résultats des essais de perméabilité avec
matériau recyclé stabilisé - Liant CSS-1**

Essai #1 (98,5% de compaction)				Essai #2 (99,4% de compaction)			
Temps écoulé (minute)	Pression (kPa)	Contre- pression (kPa)	Perméabilité k (cm/s)	Temps écoulé (minute)	Pression (kPa)	Contre- pression (kPa)	Perméabilité k (cm/s)
64	11	0	8,27E-05				
120	10	0	7,27E-06				
328	10	0	9,80E-06				
1002	10	0	6,63E-06				
1545	10	0	6,02E-06				
2470	10	0	4,40E-06				
2935	10	0	1,75E-06				
4409	10	0	1,38E-06				
6829	10	0	6,74E-07				
6891	110	100	2,46E-05				
6902	110	100	2,62E-05				
7029	110	100	2,80E-05				
7047	110	100	2,54E-05				
7066	210	200	3,43E-05	55	210	200	3,84E-05
7147	210	200	2,92E-05	62	210	200	3,66E-05
7164	210	200	3,13E-05				
7191	310	300	3,68E-05	85	310	300	4,09E-05
7244	310	300	2,80E-05	107	310	300	3,97E-05
7256	310	300	3,19E-05				
7287	410	400	3,61E-05	127	410	400	4,09E-05
8219	410	400	1,70E-05	139	410	400	3,97E-05
8285	410	400	2,17E-05				
8308	510	500	2,35E-05	159	510	500	4,89E-05
8502	510	500	3,21E-05	174	510	500	4,85E-05
8522	610	600	2,60E-05	193	610	600	5,10E-05
8618	610	600	2,09E-05	205	610	600	5,01E-05
8628	610	600	2,00E-05				
8645	710	700	2,11E-05	224	710	700	5,11E-05
9634	710	700	1,49E-05	239	710	700	4,99E-05
9679	710	700	1,03E-05	312	710	700	4,59E-05
10079	710	700	1,55E-05				
11116	710	700	1,08E-05				

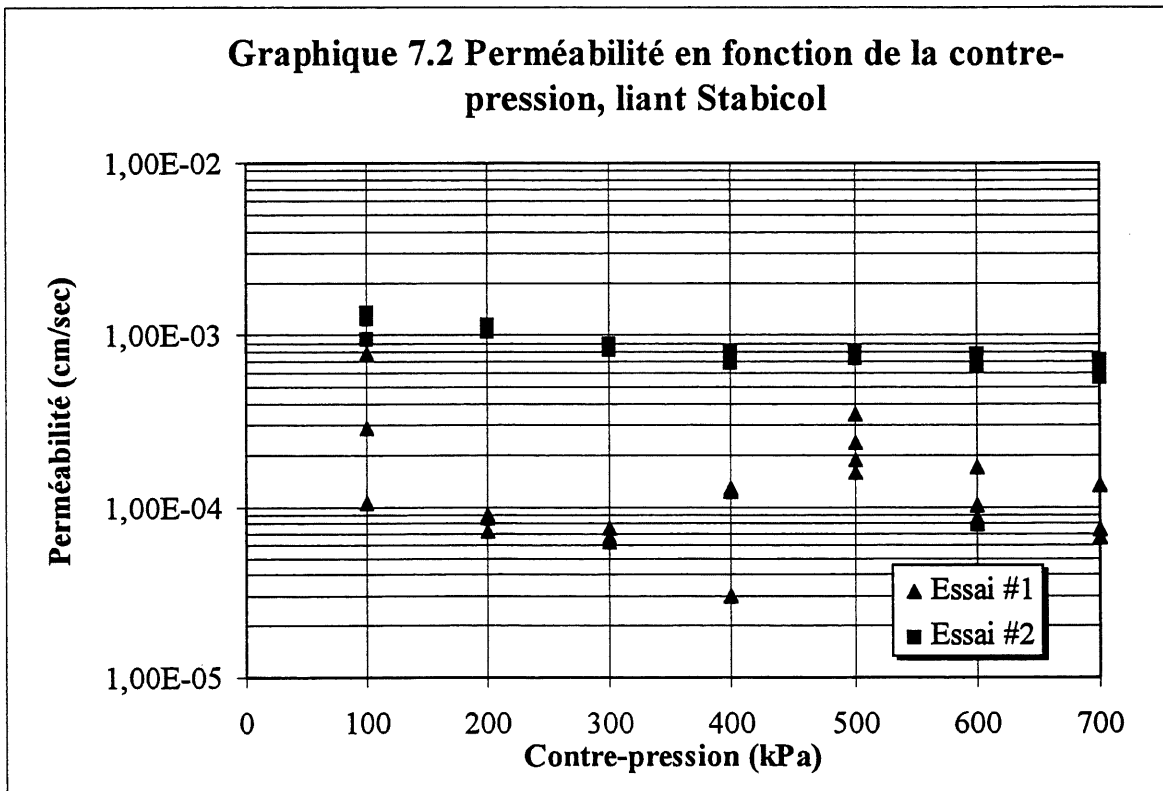
**Tableau 7.3 Résultats des essais de perméabilité avec
matériau recyclé stabilisé - Liant Stabicol**

Essai #1 (98,6% de compaction)				Essai #2 (99,0% de compaction)			
Temps écoulé (minute)	Pression (kPa)	Contre- pression (kPa)	Perméabilité k (cm/s)	Temps écoulé (minute)	Pression (kPa)	Contre- pression (kPa)	Perméabilité k (cm/s)
9	110	100	7,95E-04	12,5	110	100	9,50E-04
41	110	100	2,87E-04	13	110	100	9,50E-04
48	110	100	1,06E-04	14	110	100	1,30E-03
				15	110	100	1,36E-03
				34	110	100	1,24E-03
66	210	200	9,00E-05	50	210	200	1,10E-03
106	210	200	8,58E-05	51	210	200	1,05E-03
109	210	200	7,15E-05	52	210	200	1,16E-03
122	310	300	6,68E-05	91	310	300	8,95E-04
165	310	300	6,26E-05	92	310	300	8,26E-04
173	310	300	7,47E-05	106	310	300	8,59E-04
202	410	400	2,98E-05	120	410	400	7,81E-04
222	410	400	1,23E-04	121	410	400	8,10E-04
223	410	400	1,29E-04	140	410	400	6,93E-04
235	510	500	1,59E-04	154	510	500	7,40E-04
247	510	500	2,38E-04	158	510	500	7,54E-04
248	510	500	3,45E-04	170	510	500	8,10E-04
249	510	500	1,88E-04				
262	610	600	1,70E-04	184	610	600	7,16E-04
268	610	600	1,02E-04	188	610	600	7,80E-04
272	610	600	8,60E-05	200	610	600	6,61E-04
288	610	600	8,30E-05				
291	610	600	7,95E-05				
304	710	700	1,34E-04	215	710	700	7,16E-04
318	710	700	7,40E-05	220	710	700	6,14E-04
480	710	700	6,64E-05	240	710	700	5,73E-04
				243	710	700	6,61E-04

Graphique 7.1 Perméabilité en fonction de la contre-pression, liant CSS-1



Graphique 7.2 Perméabilité en fonction de la contre-pression, liant Stabicol



7.3 Étude sur la teneur en eau après curage

7.3.1 Objet et contexte d'étude

La teneur en eau après curage est nécessaire au calcul de la densité brute sèche et du pourcentage d'absorption lors de la saturation. La méthode usuelle pour obtenir cette teneur en eau pose certains problèmes d'ordre pratique et induit inévitablement un certain pourcentage d'erreur. De plus, dans le cadre de notre étude, l'utilisation de briquettes faiblement densifiées (10 coups/face) amplifiait les désavantages de cette méthode. C'est pourquoi une étude spéciale a été réalisée pour obtenir la teneur en eau après curage en fonction des matériaux et des procédures de compaction utilisés.

Selon la méthode de formulation des matériaux recyclés stabilisés recommandée par le Ministère des Transports du Québec, la masse dans l'air de l'échantillon, obtenue lors de la détermination de la densité de celui-ci par immersion (essai BNQ 2330-040), doit être utilisée lors du calcul de sa teneur en eau après curage. Cette façon de faire suppose qu'il n'y a aucune perte de matériau (détachement de granulat et/ou perte de bitume) entre le moment de cette pesée et le temps où l'on dépose la briquette dans l'étuve pour le séchage. Cependant, il y a inévitablement une perte appréciable de matériau, principalement pour les échantillons peu densifiés, lors de l'immersion et de la rupture des briquettes. Cette perte de granulats et de liant apporte une sur-estimation de la teneur en eau réelle de l'échantillon. Puisque nous avons besoin de cette valeur pour calculer adéquatement la densité sèche des échantillons, et que la méthode habituellement utilisée nous semblait problématique, des briquettes (24 stabilisées au CSS-1 et 24 stabilisées au Stabicol) ont été fabriquées dans le seul but d'obtenir la teneur en eau après curage.

En émettant l'hypothèse raisonnable que la variation de la teneur en eau après curage est nulle entre deux lots de briquettes identiques (même matériau et même procédure de compaction) ayant subi une cure identique, mais à des temps différents, il est possible d'utiliser les valeurs obtenues lors de cette étude pour calculer la densité brute sèche de l'ensemble des briquettes testées (ainsi que pour le calcul du contenu en eau et de l'absorption à la saturation).

Un autre objectif était également visé. Cet objectif consistait à vérifier une hypothèse souvent admise pour expliquer l'augmentation du taux de curage des matériaux stabilisés avec un liant mixte versus celui des matériaux stabilisés à l'émulsion seulement. Cette hypothèse pourrait se formuler comme suit: l'hydratation du ciment augmente la vitesse de curage non seulement par la création du produit d'hydratation (formation de liens forts) mais aussi par la disparition (par hydratation) d'une certaine quantité d'eau (amélioration des conditions de cure pour le bitume). En effet, le phénomène d'hydratation permettrait de diminuer, comme l'évaporation, la teneur en eau disponible, ce qui favorise la vitesse de durcissement du bitume lors d'une stabilisation.

7.3.2 Présentation et analyse des résultats

Le tableau 5.5 présente les résultats de l'étude sur la teneur en eau après curage. Les moyennes et les écarts-types ont été calculés à partir de six valeurs. Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

En premier lieu, il est bon de souligner l'augmentation de la teneur en eau après curage en fonction de la densification des échantillons. Cette augmentation est de 31,7% pour le matériau stabilisé au CSS-1 et de 20,7% pour celui stabilisé au Stabicol. Cette augmentation est logique. En effet, puisque l'environnement de cure était identique pour tous les échantillons, il est normal que l'évaporation soit facilitée dans les milieux moins denses. Les écarts-types sont relativement faibles et ont tendance à diminuer en fonction de la densité.

**Tableau 7.4 Résultats moyens obtenus pour
l'étude sur la teneur en eau après curage**

Liant	Procédure de compaction	Teneur en eau	
		Moyenne	Écart-type
CSS-1			
	10 coups/face	0,692	0,057
	30 coups/face	0,880	0,036
	50 coups/face	0,911	0,020
	60 coups/face	0,912	0,025
Stabicol			
	10 coups/face	1,249	0,050
	30 coups/face	1,424	0,049
	50 coups/face	1,457	0,047
	60 coups/face	1,508	0,029

La teneur en eau du matériau stabilisé au Stabicol est en moyenne 1,66 fois plus élevée que celle du matériau stabilisé au CSS-1. Ce résultat, contraire à l'hypothèse normalement émise, méritait d'être vérifié. En effet, les briquettes n'avaient pas été fabriquées et curées en même temps. Par conséquent, les conditions de curage n'étaient pas totalement identiques (même si elles devaient être de toute évidence très semblables). Huit briquettes (4 au CSS-1 et 4 au Stabicol) ont été donc fabriquées et curées en même temps, voici les résultats.

Compaction	CSS-1	Stabicol
10	0,634	1,284
30	0,890	1,560
50	0,871	1,563
60	0,853	1,496

Les résultats appuient ceux déjà obtenus lors de l'étude principale. Puisque l'hydratation du ciment est incontestable, il faut donc admettre qu'une certaine quantité d'eau est éliminée par ce phénomène. Malgré cela, la teneur en eau finale demeure plus élevée pour des conditions de

porosité très semblables. Il faut par conséquent admettre que le processus d'évaporation est ralenti lorsqu'il y a présence de ciment et/ou des produits d'hydratation de celui-ci.

Pour expliquer cette observation, il faut utiliser le phénomène d'adsorption de l'eau et émettre l'hypothèse raisonnable que les forces d'adsorption eau-ciment diminuent de façon significative le potentiel d'évaporation à une température de 38°C (voir section 6.5.4). Nous ne démontrerons pas cette hypothèse de façon analytique, mais il est raisonnable de penser que les forces d'attraction entre l'eau et les particules de ciment (et/ou les produits d'hydratation), qui possèdent une surface spécifique très importante, puissent jouer un rôle significatif dans le potentiel d'évaporation de l'eau contenue dans le matériau. Cette hypothèse prend tout son sens lorsque l'on considère que le béton de ciment doit être séché à plus de 400°C pour obtenir sa véritable teneur en eau. En effet, les produits d'hydratation adsorbent et emprisonnent les molécules d'eau. Alors, pour permettre son évaporation complète une température très élevée est nécessaire.

Dans cette optique, l'eau qui n'est pas évaporée, mais plutôt adsorbée, n'entre possiblement pas en conflit avec le phénomène de durcissement du bitume, car il est probable que le curage du bitume soit davantage modifié par la teneur en eau libre que par la teneur en eau réelle dans le matériau. Par conséquent, l'hypothèse que le ciment joue un double rôle dans le processus de curage ne peut pas être rejetée.

7.4 Étude et critique sur l'utilisation de l'essai de densité brute

7.4.1 Objet de la critique

Afin de déterminer la masse volumique des matériaux recyclés stabilisés, la procédure de formulation employée demande d'utiliser la norme BNQ 2300-040 "Mélanges bitumineux - Détermination de la densité brute et de la masse volumique des mélanges bitumineux compactés". Le résultat de cet essai, sur des échantillons fabriqués aux conditions optimales de teneur en eau et de bitume, est directement utilisé pour calculer la masse volumique visée en chantier (100% de compaction).

Puisque, la majorité de nos résultats sont exprimés en fonction de la variation de densité (pourcentage de compaction), il importait de s'assurer que cet essai n'engendrait pas un certain pourcentage d'erreur, et surtout pas un pourcentage d'erreur différentiel selon la procédure de compaction utilisée. Il faut souligner que, lors de la réalisation de l'essai, certains phénomènes observés mettaient en doute la validité des résultats. Ces phénomènes sont:

- Absorption d'eau lors de la période de trempage des briquettes. Ce phénomène est influencé par le degré de compaction de la briquette, la teneur en liant et le type de granulat.
- Désorption d'eau lors du séchage de la briquette en vue de sa pesée SSS. Ce phénomène est influencé par les mêmes propriétés que l'absorption.

Naturellement, ces phénomènes sont également présents avec des briquettes de béton bitumineux compactées, mais dans des proportions nettement moindres. De plus, ces phénomènes sont grandement influencés par le pourcentage de compaction de la briquette. Or, il y a évidemment une importante différence à cet égard au niveau de nos briquettes.

Pour permettre au lecteur d'évaluer le potentiel d'erreur différentielle, et sans présenter l'ensemble des résultats de façon précise, notons que la différence entre la pesée dans l'air et la pesée SSS est d'environ 20 grammes pour les briquettes faiblement compactées (10 coups/face) et de 4 grammes pour les briquettes fortement densifiées (50 et 60 coups/face). De plus, il est probable que le phénomène de désorption soit plus important (toutes proportions gardées) avec les briquettes faiblement densifiées, car ces dernières sont inévitablement plus perméables. Il faut également ajouter que la masse des briquettes faiblement densifiées était d'environ 1025 grammes, comparativement à environ 1150 grammes pour celles fortement densifiées. En supposant que le phénomène de désorption équivaut à 50% de l'eau absorbée dans les deux cas, avec les masses et les résultats moyens de densité ($\cong 2,110$ et $\cong 2,270$) obtenus pour les groupes de briquettes mentionnées, il est possible de calculer une erreur sur la densité de l'ordre de 4% et 0,8% pour les briquettes faiblement et fortement densifiés respectivement.

Naturellement, ces résultats sont fondés sur des hypothèses difficiles à vérifier. Néanmoins, un programme d'étude fut mis sur pied afin d'estimer la véritable erreur commise avec la réalisation de l'essai BNQ 2300-040. Avant de présenter ce programme, il importe d'analyser le problème en fonction de la formule de la densité brute.

La formule pour le calcul de la densité brute est:

$$D_B = \frac{M_A}{(M_{SSS} - M_E)} \quad (7.1)$$

D_B = Densité brute

M_A = Masse dans l'air

M_{SSS} = Masse SSS

M_E = Masse dans l'eau.

En analysant la formule et en tenant compte des phénomènes observés, il est possible de dire que l'absorption d'eau n'est pas un problème si le phénomène de désorption est nul. En effet, si un gramme d'eau est absorbé par la brique lors de l'immersion, cette quantité d'eau prend le volume (approximatif) d'un centimètre cube d'air. Par conséquent, l'eau absorbée fera augmenter la pesée dans l'eau de 1 gramme et la pesée SSS de 1 gramme (en supposant une désorption nulle). La différence entre les deux masses ne change donc pas et la densité brute n'est pas affectée. Si le phénomène de désorption n'est pas nul, le gramme d'eau préalablement absorbé n'est donc plus complètement dans la brique lors de la pesée SSS, il y a alors modification de la différence ($M_{SSS} - M_E$), et on se trouve à surévaluer la valeur de la densité brute sèche. Dans nos calculs préalables nous avons supposé que 50% de l'eau absorbée était ensuite désorbée, mais en réalité cette hypothèse n'est fondée sur aucune observation quantitative précise.

Cette étude vise donc à évaluer l'ampleur de ce problème potentiel et à déterminer la validité (ou la précision) de l'essai BNQ 2330-040 avec les matériaux recyclés stabilisés.

7.4.2 Réalisations

Afin d'évaluer l'erreur potentiellement commise par l'essai normalisé BNQ 2300-040, nous avons utilisé les briquettes provenant de l'étude sur la teneur en eau après curage pour calculer à partir de différents essais leur densité. L'emploi de ces briquettes était avantageux: les briquettes étaient disponibles, sèches et en parfait état. Voici donc les différents essais et calculs réalisés sur ces briquettes:

- Essai par immersion (3 minutes) selon la norme BNQ 2300-040.
- Essai par immersion 10 secondes.
- Essai par immersion en paraffinant les briquettes.
- Calcul de la densité par dimensionnement des briquettes.
- Calcul de la densité théorique par immersion.

Tous ces essais et calculs ont été effectués sur 24 briquettes stabilisées au CSS-1 et 24 briquettes stabilisées au Stabicol. Pour plus d'information sur les procédures et calculs relatifs à ces essais, voir la section 4.4.4.

7.4.3 Présentation et analyse des résultats

Le tableau 5.6 présente les résultats de l'étude sur le calcul de la masse volumique. Toutes ces densités sont calculées sur base sèche. Les résultats des colonnes "Immersion 10 sec.", "Immersion 3 minutes" sont calculés selon la formule de la densité brute et représentent, par conséquent, la même forme de densité. L'essai par "Immersion avec paraffine" ne permet pas de connaître la masse SSS. Par conséquent, la masse dans l'air remplace la masse SSS dans la formule de la densité brute et le résultat n'est pas le même; nous nommerons son résultat la "densité apparente". Les densités relatives à la colonne "Immersion théorique" sont calculées à partir des résultats de l'essai normalisé et par immersion après paraffinage. Le calcul de la densité par "immersion théorique" vise à rendre le phénomène de désorption nul et utilise la formule de la

densité brute sèche. Le calcul de la masse volumique par dimensionnement des échantillons inclut inévitablement les vides de la surface de ceux-ci (paroi); on ne peut donc pas comparer simplement ce résultat avec les autres sans en tenir compte. Ces derniers résultats sont présentés à titre indicatif. Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

L'essai de détermination de la densité par une immersion de 10 secondes est quasi identique à l'essai de la norme BNQ 2300-040. Sa seule différence est de minimiser le temps d'immersion, ceci dans le but évident de diminuer les phénomènes d'absorption et de désorption de l'eau. Il est bon de préciser que l'échantillon ne demeure pas dans l'eau véritablement dix secondes, mais plutôt un minimum de temps durant lequel la balance électronique s'ajuste (pour plus de renseignements, voir section 4.4.4). Le poids est alors retenu même si l'absorption se poursuit toujours (c'est d'ailleurs aussi le cas pour l'essai normalisé, mais avec un taux d'absorption moins élevé). Par conséquent, une erreur de quelques dixièmes (moins de 0,5 gramme) de gramme par pesée dans l'eau est souvent commise. Néanmoins, le nombre relativement élevé d'essais (six) permet de minimiser l'erreur sur la moyenne. Comme il est possible de le constater, les résultats ne sont pas très différents de ceux obtenus avec l'essai normalisé (3 minutes). Malgré tout, les valeurs obtenues sont toujours plus basses pour l'essai à 10 secondes d'immersion que pour celui à 3 minutes. Ceci est un indice que la méthode normalement utilisée entraîne probablement, comme nous l'avons supposé, une surévaluation de la densité du matériau recyclé stabilisé. Cependant, cette comparaison ne nous permet pas encore de juger de l'importance de cette surévaluation, car le fait de minimiser le temps d'immersion n'annule pas l'influence des phénomènes en cause.

La densité déterminée par immersion des échantillons paraffinés ne correspond pas, comme nous l'avons déjà souligné, à la densité brute sèche mais bien à la "densité apparente". Les résultats indiquent que la densité apparente est inférieure pour les échantillons stabilisés au CSS-1 à la densité brute obtenue avec l'essai normalisé, et est pratiquement identique avec les échantillons stabilisés au Stabicol.

Tableau 7.5 Résultats pour l'étude du calcul de la densité

Liant	Compaction (nb de coups/ face)	Densité moyenne (six résultats)				
		Immersion 10 sec.	Immersion 3 minutes	Immersion théorique	Immersion avec paraffine	Par dimensionnement
CSS-1	10	2,116	2,122	2,097	2,114	2,002
	30	2,213	2,222	2,204	2,218	2,143
	50	2,242	2,247	2,232	2,246	2,191
	60	2,250	2,256	2,239	2,253	2,196
Stabicol	10	2,143	2,155	2,137	2,155	2,017
	30	2,265	2,271	2,257	2,272	2,204
	50	2,293	2,297	2,284	2,298	2,240
	60	2,303	2,306	2,291	2,307	2,262

Grâce aux différentes pesées obtenues avec l'essai normalisé et l'essai avec paraffine, il est possible de calculer la densité brute sèche de façon théorique, c.-à-d. en éliminant théoriquement la désorption de l'eau (pour plus de renseignements, voir section 4.4.4). Le tableau 7.6 présente les résultats et la différence en terme de pourcentage de la densité "théorique" et relative à l'essai normalisé. Les différences ne sont pas très importantes, mais sont significatives. La différence observée peut être considérée comme "l'erreur" commise par la réalisation de l'essai normalisé avec les matériaux recyclés stabilisés étudiés. Cette erreur est de beaucoup inférieure à celle présumée. De façon générale, l'utilisation de l'essai normalisé apporte avec les échantillons compactés adéquatement (50 et 60 coups par face) une erreur de l'ordre de 0,6%, c.-à-d. que la densité mesurée correspond en fait à 100,6% de la densité réelle (avec les matériaux étudiés dans cette étude). Le pourcentage de différence est comme prévu supérieur avec les briquettes faiblement densifiées.

Tableau 7.6 Différence entre l'essai BNQ 2300-040 et la densité par "immersion théorique"

Liant	Compaction (nb de coups/ face)	Densité essai normalisé	Densité par Immersion théorique	Différence (%)
CSS-1	10	2,122	2,097	1,20
	30	2,222	2,204	0,80
	50	2,247	2,232	0,65
	60	2,256	2,239	0,77
Stabicol	10	2,155	2,137	0,86
	30	2,271	2,257	0,62
	50	2,297	2,284	0,55
	60	2,306	2,291	0,69

Malgré ces résultats démontrant un potentiel d'erreur différentielle entre les différents groupes de briquettes, aucune correction n'a été apportée en ce sens aux résultats obtenus avec l'essai normalisé (pour le calcul du pourcentage de compaction).

7.4.4 Conclusion et recommandations

Cette étude sur le calcul de la masse volumique a démontré que l'emploi de l'essai BNQ 2300-040 pour déterminer la densité brute sèche des briquettes de matériaux recyclés stabilisés entraîne une surévaluation de celle-ci. L'erreur commise ne semble toutefois pas très importante puisqu'elle se situe, dans notre cas, à environ 0,6 % de la densité théorique. Il faut cependant souligner que ce pourcentage d'erreur peut varier selon le granulat utilisé et la teneur en liant du matériau.

La densité brute sèche est utilisée comme valeur de masse volumique à atteindre en chantier; alors l'erreur sur cette densité influence l'acceptation ou la non acceptation du taux de compaction lors de la réfection. Dans ce contexte, il devient très important d'effectuer des planches d'essai sur le

chantier, afin de valider ou de rejeter la valeur de la masse volumique sèche obtenue en laboratoire. Elle est également nécessaire dans le calcul de l'indice des vides des matériaux stabilisés, caractéristique employée dans la formulation des matériaux.

L'emploi de la technique de paraffinage pour imperméabiliser les briquettes semble efficace, mais demande beaucoup de temps et les briquettes, une fois séchées et paraffinées, ne peuvent plus être testées à l'essai Marshall. Par conséquent, son utilisation est peu pratique. Dans ce contexte, cette technique n'est pas recommandable sauf dans un cadre de recherche ou pour les cas de litige. Finalement, il est possible de conclure cette section en disant que si cette étude a démontré une faille dans l'utilisation de l'essai BNQ 2300-040 avec les matériaux recyclés stabilisés, elle n'a cependant pas permis de trouver une solution palliative véritable.

7.5 Écart entre la presse Baldwin et Marshall: étude statistique

7.5.1 Objet et contexte d'étude

Il a déjà été mentionné à la section 4.3.2 que le matériau stabilisé au Stabicol sous des procédures de compaction et de curage spécifiques, c.-à-d. 50 et 60 coups/face et une cure allongée, atteignait des stabilités Marshall témoins trop élevées pour utiliser la presse normalisée sans risque de bris d'équipement. En conséquence, une presse (de marque Baldwin) à pression constante a été utilisée de façon à obtenir des résultats pour ces échantillons. La presse n'étant pas conçue pour fonctionner à vitesse constante, la vitesse d'application de la charge prescrite dans la norme (50,8 mm de déformation/minute) fut seulement approchée. Il s'ensuit une certaine "erreur" dans les résultats obtenus avec cette presse.

Par inadvertance, toutes les briquettes ayant bénéficié d'une cure normalisée + 4 jours ont été testées sur la presse Marshall. Par chance, il n'y a eu aucun bris d'équipement. Ces résultats nous permettent maintenant d'estimer "l'erreur" due à l'utilisation de la presse Baldwin, et de corriger par la suite les résultats en conséquence.

Le but de cette étude est de comparer les résultats obtenus respectivement sur la presse Baldwin et Marshall, et à l'aide de cette comparaison d'estimer la différence entre eux.

7.5.2 Problématique

L'important, dans un jeu de comparaison, c'est de comparer des tomates avec des tomates. Or, le mûrissement de nos tomates n'est pas le même. En effet, nous avons des résultats de briquettes "cure normalisée + 2 jours" et "cure normalisée + 6 jours" avec la presse Baldwin, et nous avons des résultats "cure normalisée + 4 jours" avec la presse Marshall. De plus, chacune de nos briquettes possède un pourcentage de compaction légèrement différent. Il faut donc parvenir, sur la base de certaines hypothèses et calculs, à normaliser le temps et la densité de nos briquettes en terme de stabilité Marshall. Tous les calculs sont basés sur un comportement statistique de la loi normale.

7.5.3 Procédures et résultats

En premier lieu, nous normaliserons la densité de nos briquettes. Le pourcentage de compaction visé sera de 100%. D'un point de vue statistique, cette action vise à déduire de la variation totale (dans les résultats) la partie (de cette variation) engendrée par la variation du pourcentage de compaction. Pour ce faire, le graphique de la stabilité Marshall en fonction du pourcentage de compaction a été établi pour chaque groupe de résultats. Pour la faible plage de densité présente, l'hypothèse d'un comportement linéaire a été jugée satisfaisante et un lissage correspondant a été effectué.

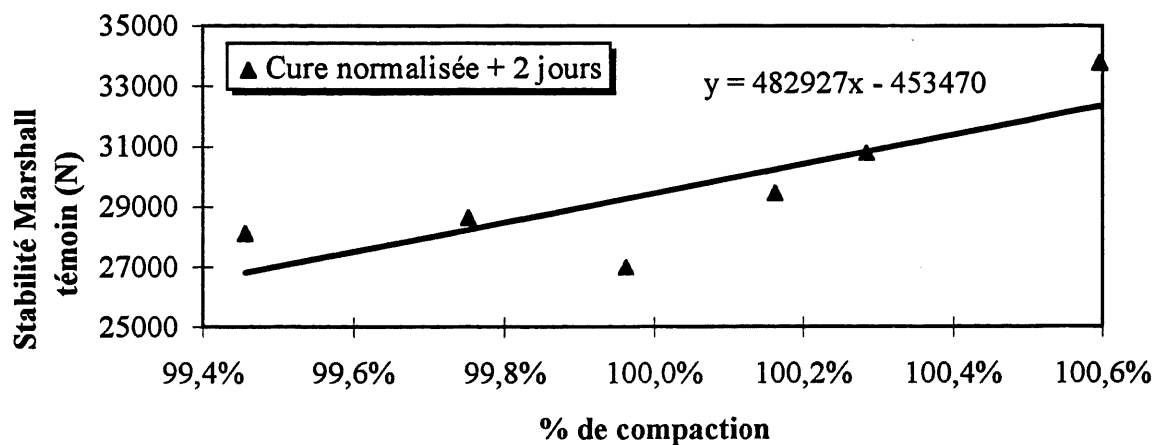
Si l'on accepte l'hypothèse que la stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction (pour la plage de densité obtenue) suit bien un comportement linéaire, la pente de la fonction correspond à la variation dans les résultats provoquée par les changements de pourcentage de compaction, alors que l'écart entre les points expérimentaux et la ligne décrit la variation due à l'essai. C'est cette dernière variation qu'il nous importe de conserver (la variation

expérimentale). Par conséquent, en calculant ces écarts et en les additionnant à la valeur théorique moyenne de briquettes compactées à 100%, une distribution des résultats pour des briquettes (fictives) à 100% de compaction est obtenue. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 7.7. Il faut noter que les valeurs présentées dans les tableaux sont arrondies alors que les calculs ont été faits avec les données complètes, c'est pourquoi certaines différences ne semblent pas justes à l'unité près.

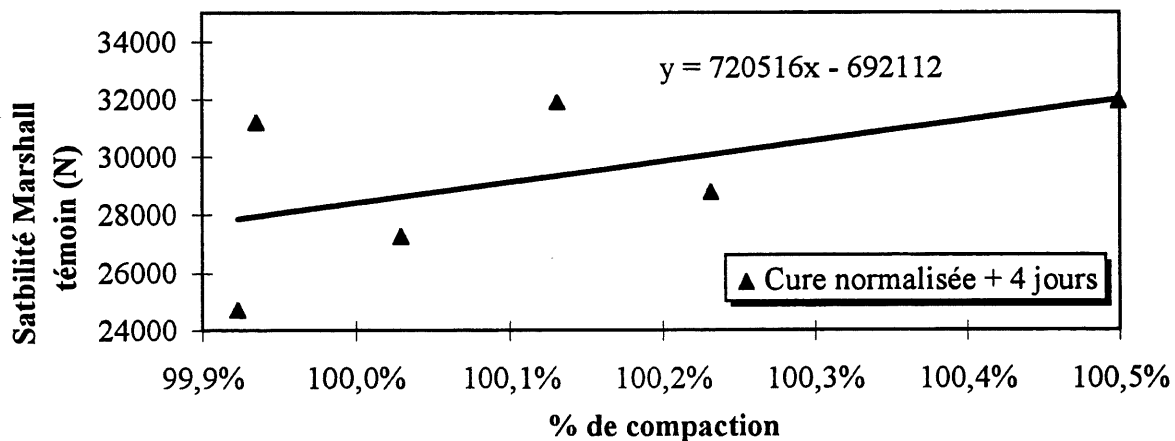
Naturellement, il est impossible de connaître la "véritable" pente du matériau et le degré de précision des régressions linéaires effectuées est difficile à estimer. Toutefois, la plage de pourcentage de compaction étant relativement faible, l'erreur commise sur l'évaluation de cette variation est jugée acceptable.

Il est encore impossible de comparer les résultats entre les deux presses, car les temps de mûrissement sont inégaux. Nous devons alors émettre l'hypothèse suivante: le comportement relatif à l'augmentation de stabilité Marshall entre une "cure normalisée + 2 jours" et une "cure normalisée + 6 jours" est linéaire en fonction du temps. Ainsi il est possible de calculer la valeur moyenne (ainsi que l'écart-type) de la stabilité Marshall que nous aurions obtenue sur la presse Baldwin pour une "cure normalisée + 4 jours" et des briquettes compactées à 100%.

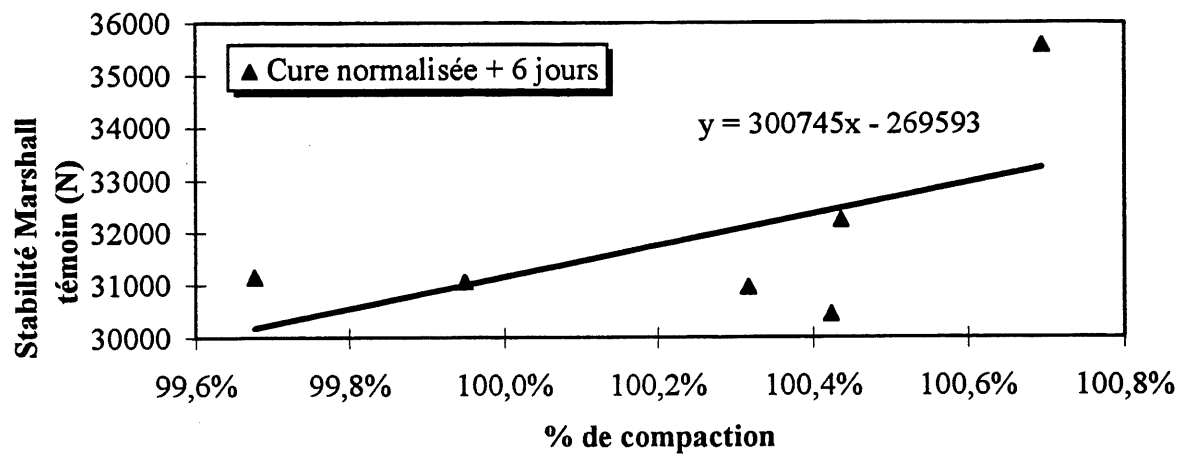
Graphique 7.3 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, presse Baldwin, cure normale + 2 jours



Graphique 7.4 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, presse Marshall, cure normale + 4 jours



Graphique 7.5 Stabilité Marshall témoin en fonction du pourcentage de compaction, presse Baldwin, cure normale + 6 jours



**Tableau 7.7 Stabilités Marshall témoin corrigées en fonction
d'une compaction de 100%**

Lot de briquettes	Résultat expérimental (N)	Pourcentage de compaction	Résultat théorique (N)	Écarts (N)	Résultat moyen théorique 100 de compaction	Résultat théorique pour 100% de compaction (N)
Stabicol cure normalisée + 2 jours 50 et 60 cps/face presse Baldwin						
	26999	99,96%	29000	-2001		26999
	28117	99,46%	27000	1117		30117
	28646	99,75%	28000	646	29000	29646
	30786	100,28%	31000	-214		28786
	29457	100,16%	31000	-1543		27457
	33764	100,60%	32000	1764		30764
Stabicol cure normalisée + 4 jours 50 et 60 cps/face presse Marshall						
	31196	99,94%	28000	3196		31196
	24719	99,92%	28000	-3281		24719
	27266	100,03%	29000	-1734	28000	26266
	31912	100,13%	29000	2912		30912
	28774	100,23%	30000	-1226		26774
	31949	100,50%	32000	-51		27949
Stabicol cure normalisée + 6 jours 50 et 60 cps/face presse Baldwin						
	31151	99,68%	30000	1151		32151
	32239	100,44%	32000	239		31239
	31054	99,95%	31000	54	31000	31054
	35567	100,69%	33000	2567		33567
	30962	100,32%	32000	-1038		29962
	30438	100,42%	32000	-1562		29438

Le tableau 7.8 présente les résultats de ces calculs statistiques. Les intervalles de confiance sont calculés en fonction de 95% de certitude, de l'écart-type correspondant, de la taille de l'échantillon correspondant et par rapport à la moyenne respective. L'erreur relative à l'utilisation de la presse Baldwin obtenue est de 2129 N, avec un écart-type de 1866 N et un intervalle de confiance de ± 862 N. Ainsi, l'utilisation de la presse Baldwin semble avoir engendré un pourcentage d'erreur (moyen) de $(2129 \div 30098) \cong 7\%$.

Tableau 7.8 Valeurs moyennes et intervalles de confiance pour chaque lot de briquettes et sur "l'erreur" de la presse Baldwin

Lot de briquette	Stabilité corrigée pour 100% de compaction (N)	Moyenne (N)	Écart-type (N)	Intervalle de confiance (95%) (N)
Stabicol cure normalisée + 2 jours 50 et 60 cps/face presse Baldwin				
	26999			
	30117			
	29646	28962	1497	1198
	28786			
	27457			
	30764			
Stabicol cure normalisée + 6 jours 50 et 60 cps/face presse Baldwin				
	32151			
	31239			
	31054	31235	1494	1195
	33567			
	29962			
	29438			
Stabicol cure normalisée + 4 jours 50 et 60 cps/face presse Baldwin (par interpolation)				
		30098	1495	846
Stabicol cure normalisée + 4 jours 50 et 60 cps/face presse Marsahl				
	31196			
	24719			
	26266	27969	2607	2086
	30912			
	26774			
	27949			
Baldwin-Marshall				
		2129	1866	862

Section 3

Essais de terrain

L'essai au pénétromètre dynamique

Cette troisième section présente et analyse les résultats obtenus à l'aide d'essais de terrain. La majorité de ces résultats est issue des expérimentations menées sur les planches d'essais construites au CTED de la ville de Montréal. Un certain nombre de résultats provenant d'essais réalisés sur le boulevard Lemire à Drummondville sont aussi présentés. Cette section s'intéresse également à l'étude d'un outil expérimental, le pénétromètre dynamique, envisagé pour caractériser les matériaux recyclés stabilisés et contrôler leur cure en chantier. Cette section est composée de deux chapitres:

Chapitre 8. Caractérisation des matériaux recyclés stabilisés par des essais de terrain

Chapitre 9. L'essai au pénétromètre dynamique

Chapitre 8. Caractérisation de matériaux recyclés stabilisés par des essais de terrain

8.0 Introduction

Les essais en laboratoire ont une importance indiscutable dans la caractérisation et le contrôle des matériaux utilisés dans les chaussées. Toutefois, il est également nécessaire de vérifier les résultats obtenus en laboratoire sur les matériaux réellement mis en place, c.-à-d. à l'aide d'essais de terrain ou de chantier. Les essais sur le terrain sont souvent coûteux, mais ils ont le mérite d'être réalisés à partir de la réalité, alors que les essais de laboratoire ne peuvent que tenter de reproduire les matériaux et les conditions environnementales en chantier. De plus, les essais de terrain sont nécessaires pour le contrôle durant et après la construction, ainsi que pour l'évaluation de la capacité structurale d'anciennes chaussées.

L'objectif ultime des essais de terrain sur les chaussées est la caractérisation de celles-ci selon leur portance et leur déformabilité, afin de pouvoir vérifier la qualité et prédire la durée de vie résiduelle de celles-ci. Il existe plusieurs approches utilisées mais en général ces essais visent soit l'obtention de la déflexion maximale représentative de la chaussée, soit l'évaluation des modules d'élasticité de celle-ci, ou les deux. Certaines approches visent à caractériser la chaussée de façon monolithique, alors que d'autres permettent de caractériser la chaussée selon un certain nombre de couches. Jumelés à des procédures et essais déterminant le niveau de dégradation de la chaussée, les essais de caractérisation de la portance d'une chaussée permettent aux ingénieurs responsables de choisir le temps et le type de réfection optimaux (coût/bénéfice) reliés à l'entretien des routes.

Dans le contexte de ce mémoire, plusieurs essais de terrain ont été réalisés pour obtenir des indices de portance (modules, déflexions représentatives, etc.) pour plusieurs matériaux recyclés stabilisés. Ces résultats nous permettent aujourd'hui d'analyser et de comparer non seulement les matériaux étudiés, mais aussi de porter un jugement sur la qualité et le potentiel des différents essais effectués dans le cadre de la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés. Certains essais de terrain ont été réalisés sur le boulevard Lemire à Drummondville, mais la majorité ont été effectués sur les planches d'essais construites grâce au Laboratoire de la ville de Montréal.

Ce chapitre présentera et discutera en premier lieu des essais utilisés au cours des différentes études portant sur les essais de terrain. En deuxième lieu, l'ensemble des résultats obtenus sur les planches d'essais seront présentés et analysés. Finalement, ce chapitre s'intéressera aux résultats de portance obtenus sur le boulevard Lemire à Drummondville et se terminera par une conclusion sur l'ensemble du sujet traité.

8.1 Les essais de terrain utilisés

8.1.1 La poutre Benkelman

L'essai à la poutre Benkelman a été développé dans les années cinquante et a été utilisé partout (ou presque) dans le monde. Même si cet essai est de moins en moins utilisé, il demeure une référence importante dans l'évaluation de la capacité portante d'une chaussée, car plusieurs méthodes de conception des chaussées se sont appuyées sur cet essai (ex: le programme de l'essai de l'AASHTO). Il s'agit donc d'une caractéristique empirique importante pour établir des comparaisons. Cet essai détermine le rebondissement maximal d'une chaussée sous le poids d'un essieu de 8 000 kg supporté par deux roues doubles dont la pression des pneus est de 552 kPa. Après certaines corrections de la valeur brute obtenue (en fonction de la température, temps de l'année etc.), la déflexion (rebondissement) maximale représentative est déterminée. Certaines chartes ont été établies permettant de connaître le nombre de passages d'essieu équivalent que la chaussée peut supporter avant une intervention en fonction du rebondissement maximal représentatif obtenu à la poutre Benkelman. On observe, en général, des rebondissements représentatifs de l'ordre de 0.5 à 1.0 mm.

8.1.2 L'essai Dynaflect et FWD (Falling Weight Deflectometer)

Les appareils Dynaflect et FWD sont deux outils aptes à caractériser le bassin de déflexion d'une chaussée sous un chargement dynamique. La caractérisation du bassin de déflexion implique la détermination de la déflexion maximale ainsi que la forme de ce dernier. À partir de ce bassin de déflexion, de la stratigraphie de la chaussée, de la température du revêtement et de certaines autres considérations, il est possible à l'aide de logiciels d'obtenir les résultats de la déflexion maximale et de modules en fonction des couches de la chaussée. Il est possible avec ces outils, et à partir de certaines corrélations entre ceux-ci et la poutre Benkelman, d'utiliser la même approche d'évaluation empirique que celle utilisée avec la poutre Benkelman (en utilisant seulement la déflexion maximale représentative). Les modules dynamiques calculés sont souvent jugés équivalents au module résilient. Grâce à l'obtention de modules élastiques dynamiques, les résultats peuvent également être utilisés dans des systèmes d'évaluation analytique. Théoriquement, l'analyse d'un bassin de déflexion permet d'obtenir des indications fiables de modules pour deux couches de matériaux, mais avec certaines hypothèses et l'expérience de l'analyste il est possible d'estimer les modules pour un nombre de couche plus important.

Grossièrement et théoriquement, les deux appareils permettent d'estimer les mêmes paramètres. Il y a cependant d'importantes différences entre les deux outils. La première différence notable est reliée au mode d'application de la charge. L'appareil Dynaflect applique une force statique de 8 kN (poids de l'appareil) ainsi qu'une force dynamique rotative (avec une fréquence de 8 Hz) équivalente à 4.4 kN. Cette force est appliquée sur deux roues qui possèdent chacune une surface de 2580 mm². Le bassin de déflexion est déterminé à l'aide de 5 géophones qui permettent d'obtenir la forme du bassin pour un rayon maximum de 1,2 mètre. En général, les analyses des bassins de déflexion obtenus par le Dynaflect se contentent de présenter deux modules: par exemple, un module pour la chaussée et un module pour l'infrastructure, ainsi qu'une déflexion maximale représentative.

Le mode d'application de la charge est très différent avec le FWD. Cet appareil permet d'appliquer un chargement dynamique qui peut varier de 7 à 125 kN. Le chargement est obtenu à l'aide d'une masse tombant sur une plaque, créant une impulsion simulant le passage d'un camion à une vitesse

de 65 à 80 km/heure. La surface de la plaque est généralement de 70 700 mm² (300 mm de diamètre), mais il est aussi possible d'utiliser une plaque ayant une surface de 159 000 mm² (450 mm de diamètre) [ST-LAURENT et coll., 1995]. Pour faire varier la force de chargement, la masse est soulevée à des hauteurs différentes. Normalement, un essai compile les résultats pour trois chargements différents, permettant ainsi d'estimer l'influence du taux de chargement sur les différents modules de la chaussée. Finalement, le bassin de déflexion est caractérisé grâce à 7 géophones (certains appareils en possèdent jusqu'à neuf). Selon le type de chaussée (rigide ou flexible) testé, le rayon maximum du bassin de déflexion peut varier de 1,2 à 2,4 mètre. Le FWD est aujourd'hui considéré comme l'outil le plus performant en matière d'auscultation des chaussées [ST-LAURENT et coll., 1995]. Le niveau de charge beaucoup plus élevé du FWD, comparé à celui du Dynaflect, lui permet de tester des structures de chaussées très portantes.

Comme il a déjà été mentionné, il existe des corrélations entre les résultats du FWD et du Dynaflect et ceux de la poutre Benkelman. Néanmoins, il faut utiliser ces corrélations avec prudence. En effet, en 1987 l'Alberta Transportation and Utilities a réalisé une vaste étude sur le FWD, le Dynaflect et la poutre Benkelman [BEGIN, 1987]. Plusieurs corrélations ont été présentées en fonction de divers types de chaussée. La corrélation entre le FWD et le Dynaflect concernant la déflexion n'a pas varié en fonction du type de chaussée auscultée et est considérée excellente. Cependant, les corrélations entre le FWD et la poutre Benkelman sont différentes selon le type de chaussée testée et sont en général moins précises.

Le principe permettant d'estimer les modules de chacune des couches de la chaussée est basé sur un rétrocalcul du bassin de déflexion. Essentiellement, les logiciels permettant de traiter les résultats de bassins de déflexion obtenus à l'aide des appareils FWD ou Dynaflect, génèrent, à partir des paramètres de la chaussée testée et de certaines hypothèses émises par l'utilisateur, une série de bassins de déflexion. Ensuite le logiciel compare, en terme de déflexion maximale et de forme, les bassins de déflexions obtenus à l'aide des appareils de mesure et ceux qu'il vient de calculer. En minimisant les écarts entre les bassins mesurés et ceux calculés, on détermine la structure (en fonction des modules de chaque couche) qui reflète le mieux les conditions de terrain. Les valeurs de modules ainsi obtenus peuvent alors être utilisées pour estimer la vie résiduelle de la chaussée et/ou pour identifier les sections faibles d'une route.

Il existe un nombre très important de logiciels de rétrocalcul. Les résultats varient selon le logiciel utilisé, le type de chaussée testée, l'expérience de l'analyste, la qualité et la précision des paramètres d'entrée etc. Le programme SHRP (Strategic Highway Research Program) s'est intéressé à cette technique d'évaluation des chaussées et a analysé plusieurs logiciels de rétrocalcul. Trois logiciels ont été sélectionnés comme adéquats et donnant des résultats compatibles entre eux: MODULUS4, MODCOMP3 et WESDEF.

Rada et collaborateurs [RADA et coll., 1992a et 1992b] ont présenté une synthèse de plusieurs études ayant utilisé et comparé ces trois logiciels ainsi que quelques autres (BISAR, BISDEF, CHEVDEF et ELSDEF). Ces études présentaient les différents résultats obtenus par les logiciels pour les mêmes bassins de déflexion relevés au FWD, et ce, pour différentes couches et plusieurs types de chaussée. Ils ont ensuite calculé les ratios des modules obtenus par chacun des trois logiciels recommandés par le programme SHRP et ceux calculés avec BISAR. En général les ratios sont très semblables, mais dans certaines conditions il y avait d'importantes différences. Par exemple, on note des ratios variant de 1,99 à 3,96 pour l'évaluation d'une couche de fondation stabilisée à la chaux. Cette expérience a été répétée avec les autres logiciels et d'autres structures de chaussée. Soucy et Contant arrivent à la conclusion que le choix du logiciel de traitement devrait être fait en fonction du type de chaussée testée. Par exemple, ils recommandent l'utilisation du logiciel MODULUS4 pour les chaussées flexibles sur fondation granulaire non stabilisée. Malheureusement, aucune étude n'a analysé les résultats obtenus pour des chaussées dont la fondation était stabilisée à l'aide d'émulsion de bitume ou de mousse de bitume. Il est également mentionné que, selon l'expérience de l'utilisateur dans le domaine spécifique des matériaux de chaussée et aussi avec le logiciel utilisé, les résultats peuvent varier de 30%. MODULUS4 est le logiciel qui montre la plus faible susceptibilité à l'usager, affichant un coefficient de corrélation entre experts et non-experts de 0,92.

8.1.3 Essai de plaque

Un essai de plaque caractérise un matériau sous un chargement statique. La norme utilisée pour la réalisation de cet essai est désignée par le standard ASTM D-1195. Cette norme présente une procédure qui permet d'obtenir la charge nécessaire à l'enfoncement de 0,5" (12,77 mm) pour dix répétitions de chargement-déchargement par palier de chargement utilisé. Cependant, toute la procédure est rarement appliquée et les résultats obtenus ne correspondent pas à celui de la charge pour 0,5" d'enfoncement. La procédure d'essais suivie lors de nos campagnes de relevés permettait d'obtenir deux modules: le module de réaction du sol "k" (MPa/m) et un module élastique statique E (MPa). Le module de réaction du sol "k" est un paramètre purement empirique, c.-à-d. que les valeurs obtenues sont intimement reliées aux conditions de la structure testée. Le module élastique statique E est un paramètre analytique obtenu en fonction de la théorie élastique et des abaques de Burmister. Il est donc possible d'utiliser le module E pour des conditions de structure de chaussée différentes de celle testée.

Équipements

Afin d'appliquer la charge nécessaire, un camion dont le chargement dépassait les 10000 kg servait de buté au système de chargement. Le système de chargement était composé d'un vérin et d'une rotule positionnée au centre d'une plaque de 25.5 cm de diamètre. Le système hydraulique du vérin était connecté à une jauge permettant la lecture de chargement avec une précision de 250 livres (114 kg). Une poutre d'environ 5.5 mètres de longueur servait de support à trois déflectomètres d'une précision de 0.01 mm. La température était notée à l'aide d'un thermomètre à béton. La température notée correspond à la température extérieure à l'ombre.

Procédure d'essai utilisée

Comme il a été mentionné, la procédure d'essai suivie n'est pas identique à celle décrite dans la norme ASTM D-1195, mais l'esprit de cette norme a été conservé en grande partie. Trois paliers de chargement différents étaient utilisés par essai, pour chaque palier 5 cycles de chargement-déchargement étaient réalisés. Une étape de chargement ou de déchargement était complétée lorsque le mouvement moyen de la plaque était inférieur à 0,025 mm par minute pour 3 minutes consécutives (à ce moment, on juge que la déformation sous chargement correspond à une valeur

statique). La valeur d'enfoncement au dixième cycle pour chaque palier était obtenue par extrapolation linéaire sur papier semi-log (après avoir corrigé tel que le stipule la norme les valeurs pour le zéro de contrainte et zéro d'enfoncement).

Calcul et discussion sur le module "k"

Une fois la valeur de l'enfoncement au dixième cycle obtenue, le module "k" est directement calculé par la simple division de la contrainte appliquée (palier de chargement) par l'enfoncement au dixième cycle (en mètre). Puisque des essais de plaque avaient été effectués sur la structure avant la mise en place des matériaux recyclés stabilisés, la valeur du module "k" pour l'infrastructure (dans notre cas l'infrastructure + fondation en pierre) était donc connue. La différence entre le module "k" de l'infrastructure et celui obtenu après la mise en place (et le mûrissement) du matériau recyclé stabilisé représente le gain de portance (en terme de module de réaction du sol) engendrée par l'ajout de ce matériau (pour l'épaisseur ajoutée).

Le module "k" est influencé par une composante élastique qui est la déformation (enfoncement) sous chargement, et une composante inélastique qui est la déformation résiduelle après dix cycles de chargement-déchargement. Par conséquent, les valeurs obtenues sont le reflet de deux paramètres: la déformabilité d'une structure de chaussée sous un chargement statique et le pourcentage de rebondissement élastique des matériaux en place.

Calcul et discussion sur le module "E"

Le module "E" est calculé à l'aide de la différence entre les résultats de l'enfoncement après chargement et de l'enfoncement résiduel après déchargement du cycle précédent. Grâce à cette valeur et à l'aide des abaques de Burmister (et du module "E" de la fondation), il est possible de calculer le module "E" pour le matériau testé. Par conséquent, une valeur du module "E" pour chaque cycle de chargement peut être calculée. Néanmoins, nous avons préféré calculer un seul module "E" par palier de chargement en utilisant la moyenne des déformations pour les 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} cycle de chargement-déchargement.

Le module "E" est influencé par la seule composante élastique du matériau testé (sous chargement statique), puisque son calcul ne fait pas intervenir la déformation résiduelle (des cycles de chargement précédents) dans le matériau.

8.1.5 L'essai au pénétromètre dynamique

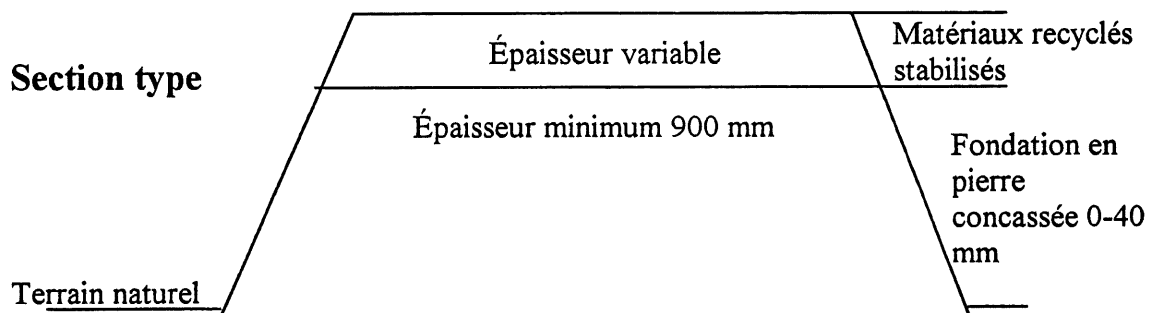
Le pénétromètre est un outil expérimental dont l'utilisation est présentement envisagée dans le contrôle de la cure des matériaux recyclés stabilisés. Pour plus d'informations au sujet de la procédure d'essai et des résultats obtenus, le lecteur peut se référer au chapitre 9 qui est entièrement consacré à cet essai.

8.2 Résultats obtenus sur les planches d'essais

8.2.1 Description des planches d'essais

Le lieu choisi pour la construction des planches d'essais à Montréal est situé dans l'ancienne carrière Miron, aujourd'hui le CTED de la ville de Montréal. La figure 8.1 présente la section type des planches d'essais ainsi qu'un plan de localisation pour 1995 et 1996 des différents matériaux mis en place.

Figure 8.1 Section et plan de localisation des planches d'essais pour 1995 et 1996



Plan de localisation 1995

#1, 170mm Émulsion	#2, 190mm Émulsion +ciment	#3, 220mm Émulsion+ chaux	#4, 205mm Mousse +ciment	#5, 220mm Mousse	#6, 205mm Mousse +chaux	#7, variable Hi-tech	
0+000	0+017m	0+034m	0+051m	0+063m	0+074m	0+085	0+102m

Plan de localisation 1996

#1, 170mm Émulsion	#2, 190mm Émulsion +ciment	#3, 220mm Émulsion+ chaux	#4, 180mm Mousse +chaux	#5, 240mm Mousse +ciment	#6, 270mm Mousse	#7, variable Hi-tech	
0+000	0+017m	0+034m	0+051m	0+063m	0+074m	0+085	0+102m

Comme le montre cette figure, la fondation est constituée de 900 mm (minimum) de pierre 0-40mm, laquelle est directement placée sur l'infrastructure. L'infrastructure est composée elle-même de pierre concassée reposant sur un mélange de matières organiques et de sol rocheux et/ou terreux. La décomposition de ces matières organiques est cependant limitée car cette section du CTED est une des plus anciennes du site d'enfouissement. La construction de la fondation a eu lieu entre le 15 et le 18 août 1995. La mise en place de la pierre a été effectuée en plusieurs couches afin de ne jamais dépasser 300mm de pierre non-compactée. L'ensemble de la construction a été réalisé sous contrôle afin d'obtenir la meilleure homogénéité possible. Les épaisseurs indiquées pour chacune des planches ont été obtenues par des carottes prélevées aux endroits où des essais de plaque avait été effectués. Les valeurs présentées indiquent la moyenne des épaisseurs des carottes. Naturellement, l'épaisseur moyenne réelle des planches peut différer quelque peu de ces valeurs. On a remarqué, à certaines reprises, des écarts relativement importants (± 50 mm) entre la carotte la plus courte et la plus longue à l'intérieur d'une même planche.

Les planches #1, #2 et #3 n'ont pas été modifiées en 1996, c.-à-d. que les mêmes matériaux sont demeurés en place. C'est trois planches ont été construites le 26 septembre 1995. Le granulat recyclé est le même pour les trois planches et est composé de 70% de béton de ciment concassé (en fait 70% de béton de ciment et 30% de béton bitumineux concassé) et de 30% de béton bitumineux concassé. En réalité, le granulat est pratiquement un mélange à part égale (50-50) de béton de ciment et bitumineux concassé. Voici le contenu en liant de ces trois planches:

Planche #1, Émulsion:

- Stabilisation à l'émulsion de bitume CSS-1.
- Teneur en bitume résiduel total 3,5% (ajout d'environ 1,5% de nouveau bitume par l'émulsion).

Planches #2, Émulsion+ciment:

- Stabilisation à l'émulsion de bitume CSS-1 et 2% d'ajout de ciment.
- Teneur en bitume résiduel total 3,5%, teneur en liant total 5,5%.

Planches #3, Émulsion+chaux:

- Stabilisation à l'émulsion de bitume CSS-1 et 1% de chaux ajouté.
- Teneur en bitume résiduel total 3,5%, teneur en liant total 4,5%.

Ces matériaux ont été fabriqués en centrale de concassage et d'enrobage. Ces planches ont bénéficié d'excellentes conditions de cure à jeune âge, car la température était généralement chaude et ensoleillée durant le jour, de plus il ventait constamment sur le site.

La planche #7 nommé Hi-tech est un béton bitumineux à 100% recyclé. Ce produit est fabriqué à partir de résidus de planage, est chauffé (température inconnue) et bénéficie d'un faible ajout de nouveau bitume (% inconnu). Les caractéristiques et le contrôle entourant ce matériau sont peu développés. De plus, il ne s'agit pas d'un matériau stabilisé. En conséquence, nous présenterons les résultats obtenus avec ce matériau, mais nous n'analyserons pas en profondeur ces derniers. La planche fut construite le 2 octobre 1995.

Les planches #4, #5 et #6 ont été détruites et reconstruites en 1996. Ces matériaux utilisent un granulat constitué de 50% de pierre de carrière et 50% de résidus de planage (béton bitumineux concassé). La pierre utilisée en 1995 était relativement schisteuse. De plus, les planches #5 et #6 ont subi à très jeune âge des conditions de cure extrêmement difficiles (pluie abondante) et les conditions de construction n'ont pas été idéales. Les résultats obtenus ont par conséquent été jugés peu représentatifs et il a été décidé de reconstruire ces trois planches. Néanmoins, plusieurs résultats ont été obtenus sur ces planches et seront présentés, voici donc la composition en liant de celles-ci:

Planches #4 1995, Mousse+ciment:

- Ajout approximatif de 3% de bitume et 3% de ciment.
- Teneur en bitume résiduel de 5,35%, teneur en liant total 8,35%.

Planches #5 1995, Mousse:

- Ajout approximatif de 3% de bitume.
- Teneur en bitume résiduel total de 5,35%.

Planches #6 1995, Mousse+chaux:

- Ajout de 3% de bitume et 2% de chaux.
- Teneur en bitume résiduel total de 5,35%, teneur en liant total de 7,35%.

La planche #4 fut construite le 3 octobre 1995, alors que les planches #5 et #6 furent construites le 5 octobre 1995.

En 1996, une pierre non schisteuse a été employée et les conditions de cure ont été très bonnes. Voici la description de ces nouvelles planches.

Planches #4 1996, Mousse+chaux:

- Ajout de 3% de bitume et 1,5% de chaux.

Planches #5 1996, Mousse+ciment:

- Ajout de 3% de bitume et 1,5% de ciment.

Planches #6 1996, Mousse:

- Ajout de 3% de bitume.

Ces planches furent toutes construites le 29 août 1996.

8.2.2 Présentation et analyse des résultats à la poutre Benkelman

Les relevés à la poutre Benkelman ont été réalisés par le CRCAC (Centre de Recherche et de Contrôle Appliqué à la Construction). Des relevés ont été faits, sur les planches construites en

1995, le 11 octobre 1995, alors que les relevés, sur les planches de 1996, ont été faits le 26 septembre 1996. Le tableau 8.1 présente ces résultats. Il est important de rappeler que les résultats de 1996 pour les planches Mousse, Mousse+ciment et Mousse+chaux n'ont pas été obtenus sur les mêmes planches construites en 1995, mais bien sur les nouvelles planches de 1996. Les intervalles de confiance (\pm) sont calculés en fonction de 95% de confiance avec les écarts-types correspondants.

Les écarts-types étant évalués sur un nombre restreint de données (en général 4), il faut estimer l'intervalle de confiance de façon moyenne. Ainsi, l'intervalle de confiance moyen est d'environ ± 12 centièmes de millimètre. À l'égard des résultats moyens obtenus (entre 27 et 70), le pourcentage d'erreur potentiel maximal peut varier de 17 à 44%. Ce pourcentage d'erreur potentiel est à notre avis beaucoup trop élevé. Afin de diminuer le pourcentage d'erreur potentiel, il aurait fallu réaliser au moins 8 essais par planche. Ainsi un intervalle de confiance moyen d'environ 7 à 8 centièmes de millimètre aurait été obtenu. Il est normal d'obtenir une variation assez importante dans les résultats à la poutre Benkelman. En effet, les matériaux testés ne sont pas totalement homogènes. De plus, l'Alberta Transportation and Utilities [BEGIN, 1987] a réalisé une étude sur la répétabilité de certains essais. L'essai à la poutre Benkelman a présenté un coefficient de corrélation moyen de 83% entre deux séries d'essais réalisés aux mêmes endroits. Même si ce coefficient est considéré très bon, il demeure que l'essai à la poutre Benkelman provoque une variation plus importante que le FWD (qui a obtenu un coefficient de corrélation de 95 à 99% selon le cas).

Il est important de spécifier que les valeurs présentées sont à l'état brut, c.-à-d. qu'elles représentent simplement le rebondissement à la poutre Benkelman multiplié par deux (tel que spécifié par la norme) et qu'aucune correction (pour la température ou autre paramètre) n'a été appliquée.

Tableau 8.1 Résultats des essais à la poutre Benkelman

Planche	1995		1996		Planche	1995		1996	
	T°C	10 ⁻² mm	T°C	10 ⁻² mm		T°C	10 ⁻² mm	T°C	10 ⁻² mm
Émulsion									
	12	44	19	50	Mousse	13	65	19	74
	12	31	19	54		13	72	19	76
	17	31	19	20		15	75	19	40
	17	22	19	18		15	58	19	58
Moyenne	14,5	32	19	35,5	Moyenne	14	67,5	19	62
Écart-type		9,1		19,1	Écart-type		7,6		16,7
Intervalle (±)		8,9		18,8	Intervalle (±)		7,4		16,4
Émulsion+ ciment									
	12	26	19	36	Mousse+	13	54	19	44
	12	38	19	38	ciment	13	41	19	56
	17	25	19	26		15	41	19	40
	17	56	19	8		15	29	19	32
Moyenne	14,5	36,3	19	27	Moyenne	14	41,3	19	43
Écart-type		14,4		13,7	Écart-type		10,2		10,0
Intervalle (±)		14,1		13,4	Intervalle (±)		10,0		9,8
Émulsion+ chaux									
	13	50	19	56	Mousse+	13	65	19	76
	13	56	19	54	chaux	13	83	19	74
	17	22	19	30		15	68	19	40
	17	46	19	32		15	63	19	42
Moyenne	15	43,5	19	43	Moyenne	14	69,8	19	58
Écart-type		14,9		13,9	Écart-type		9,1		19,7
Intervalle (±)		14,6		13,6	Intervalle (±)		8,9		19,3
Hi-tech									
	15	31	19	52					
	15	32	19	56					
	15	26	19	38					
	15	39	19	50					
	15	59							
	15	46							
	15	44							
	15	27							
Moyenne	15	38	19	49					
Écart-type		11,3		7,7					
Intervalle (±)		7,8		7,6					

Il est également important de souligner que le résultat à la poutre Benkelman est empirique et qu'il évalue la chaussée de façon monolithique. Par conséquent, les valeurs obtenues sont reliées aux conditions des chaussées évaluées, c.-à-d. une infrastructure en matière organique avec de la roche et de la terre, environ 1 mètre de pierre 0-40 mm et approximativement 200 mm de matériaux recyclés stabilisés correspondants. La comparaison entre les divers matériaux recyclés stabilisés demande que l'épaisseur des couches de ces matériaux soit la même. En conséquence, les entrepreneurs devaient mettre en place 200 mm de matériaux sur la fondation en pierre. Toutefois, cette opération n'a pas été réussie avec la même justesse pour toutes les planches. Des campagnes de carottage ont permis d'obtenir certaines valeurs d'épaisseurs pour chaque planche dont les épaisseurs moyennes obtenues sont présentées sur le plan de localisation (Émulsion 170 mm, Émulsion+ciment 190 mm, Émulsion+chaux 220 mm, Mousse 1996 270 mm, Mousse+ciment 1996 240 mm et Mousse+chaux 1996 180 mm). Les épaisseurs sont donc assez variables. Nous négligerons toutefois ces différences dans l'analyse sur les résultats de la poutre Benkelman.

Il est impossible d'établir des corrections en fonction de la température, car les systèmes de corrections des valeurs Benkelman en fonction de ce paramètre sont basés sur des structures de chaussées recouvertes d'un pavage. Néanmoins, les températures de surface sont indiquées. En 1996, tous les essais ont été réalisés sur une surface à 19°C, alors qu'en 1995 la température moyenne était de 14°C à 15°C avec des variations maximales de 5 degrés. À titre indicatif, pour une structure composée d'une fondation granulaire et un pavage en béton bitumineux, lorsque la température est de 15°C, le facteur multiplicatif pour obtenir le résultat Benkelman à 20°C est d'environ 1,04 [YODER et coll., 1975]. En conséquence, la variation de température n'apporte probablement pas d'erreur très importante (surtout si on la compare à l'erreur potentielle sur la moyenne).

Malgré toutes les limitations mentionnées, les valeurs obtenues nous permettent d'établir une analyse intéressante. Les résultats moyens varient de 27 à 70 centièmes de millimètre. En utilisant les chartes développées par "The California Division of Highways" il est possible d'estimer le nombre de passages de roue équivalente de 5000 lb (pas le EAL de 18 000 lb normalement utilisé au Québec) [YODER et coll., 1975] en fonction du rebondissement Benkelman. Ainsi, pour la

structure permettant un rebondissement Benkelman de 0,27 mm, une réfection serait nécessaire après environ 100 millions de passages de roues équivalentes, alors que pour la structure qui a obtenu un rebondissement moyen d'environ 0,70 mm, une réfection serait nécessaire après seulement 500 000 à 1 million de passages de roues équivalentes. Notons que ce système apporte une approximation grossière du nombre de passages et qu'il ne tient pas compte des conditions environnementales qui sévissent au Québec. Néanmoins, la différence est très marquée.

Parmi tous les résultats moyens observés, certains nous apparaissent quelques peu incohérents. Le résultat de la planche Émulsion+ciment versus celui de la planche Émulsion pour l'année 1995 en est un exemple. En effet, le rebondissement observé pour la planche Émulsion+ciment est supérieur à celui de la planche Émulsion, ce qui est contraire à toute logique (et à l'inverse des résultats obtenus avec les autres essais). Néanmoins, en utilisant pour les planches stabilisées avec l'émulsion la valeur moyenne des deux années, cette invraisemblance disparaît.

En utilisant la moyenne de 1995 et 1996 pour les planches contenant de l'émulsion, et les résultats de 1996 pour les planches stabilisées avec de la mousse, nous obtenons le classement suivant:

1. Émulsion+ciment: 31,7 (10^{-2} mm)
2. Émulsion: 33,8 (10^{-2} mm)
3. Mousse+ciment: 43 (10^{-2} mm)
4. Émulsion+chaux: 43,3 (10^{-2} mm)
5. Mousse+chaux: 58 (10^{-2} mm)
6. Mousse: 62 (10^{-2} mm)

On remarque trois groupes relativement distincts. Cependant les quatre premières planches ne sont pas statistiquement différentes. Les planches Mousse+chaux et Mousse sont nettement moins performantes que les autres.

Il est plutôt surprenant d'observer que la planche Mousse+ciment n'obtienne pas une meilleure performance. En effet, cette planche est généralement classée par les autres essais (sections suivantes) comme le matériau le plus performant. En analysant le mode d'opération de l'essai à la

poutre Benkelman, il est cependant possible d'expliquer ce comportement. Le résultat de l'essai Benkelman est le rebondissement obtenu après un chargement. Cette valeur est en premier lieu influencée par la déflexion de la chaussée sous le chargement appliqué (plus la déflexion est importante, plus le rebondissement est élevé), mais elle est également influencée par le pourcentage de rebondissement élastique. Sur une chaussée déjà circulée, où plusieurs cycles de chargement-déchargement ont été appliqués par le trafic, le pourcentage de rebondissement est toujours près de 100%, mais sur les planches d'essais, où le trafic était très limité, ce n'est pas le cas. Par exemple, si un matériau totalement plastique (aucun rebondissement) était testé à la poutre Benkelman, le résultat serait 0,00 mm. On supposerait alors que le matériau testé est très performant, mais ce ne serait possiblement pas le cas. Or, les matériaux stabilisés avec ajout de ciment (et particulièrement Mousse+ciment) ont démontré, lors des essais de plaque (résultats présentés en annexe), des pourcentages de rebondissement supérieurs aux matériaux stabilisés sans ajout cimentaire. En conséquence, les résultats à la poutre Benkelman relatifs aux planches Émulsion et Émulsion+chaux sont probablement surévalués à cause d'un pourcentage de rebondissement nettement inférieur à 100%. Pour ces raisons, le classement proposé par l'essai Benkelman n'est pas très crédible et ne reflète possiblement pas la réalité.

8.2.3 Présentation et analyse des résultats à l'essai Dynaflect

Le tableau 8.2 présente les résultats moyens obtenus à l'essai Dynaflect lors des campagnes de relevés réalisées le 10 octobre 1995 et le 26 septembre 1996 par le CRCAC. Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante. Le tableau indique un "module chaussée" et un "module sol", ainsi qu'une déflexion calculée. L'analyse est effectuée avec un logiciel développé au CRCAC. Le module chaussée est en fait le résultat pour les matériaux recyclés stabilisés en surface, alors que le module sol correspond au module global de la fondation et de l'infrastructure. La déflexion calculée est en réalité la déflexion maximale représentative (résultat Benkelman). Les valeurs présentées dans ce tableau sont à l'état brut, c.-à-d. qu'aucune correction pour la température et/ou pour le temps de l'année n'a été appliquée. Les intervalles de confiance sont calculés pour 95% de certitude.

Les variations observées de la déflexion calculée entre les différentes planches sont insignifiantes. Par exemple, les résultats de 1996 présentent des déflexions calculées variant de 45 à 48. Cette très faible variation n'est pas logique. De plus, les planches Mousse et Mousse+chaux 1995 obtiennent des déflexions inférieures aux planches de 1996, alors que les planches 1996 de Mousse et Mousse+chaux ont obtenu de meilleurs résultats de façon généralisée (pour les autres essais). De plus, ce paramètre est supposé se rapprocher du résultat Benkelman. Or, force est d'admettre que les résultats sont particulièrement différents, surtout pour les planches Mousse et Mousse+chaux. En définitive, les résultats Dynaflect de la déflexion calculée ne permettent pas une réelle différenciation des matériaux recyclés stabilisés; toutes les structures de chaussées testées pourraient être ainsi jugées similaires et très portantes. Il est probable que le CRCAC ait appliqué un seul type de corrélation pour traduire les déflexions maximales relevées au Dynaflect en déflexions représentatives. Or, l'Alberta Transportation Utilities [BEGIN, 1987] a démontré que les corrélations entre la valeur de déflexion maximale obtenue à l'aide d'appareil comme le Dynaflect (et le FWD) sont adéquates, mais dépendent en grande partie du type de chaussée testée. En d'autres termes, une corrélation établie pour une chaussée possédant une fondation en sol-ciment ne peut être appliquée pour une structure ayant une fondation en pierre concassée.

Tableau 8.2 Résultats l'essai Dynaflect

Planche	1995				1996			
	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)
Émulsion								
Moyenne	21	450	301	39	24	452	255	45
Écart-type		151	46	3		95	32	2
Intervalle(±)		121	37	2		76	26	2
Émulsion+ciment								
Moyenne	22	414	292	40	24	433	260	45
Écart-type		48	20	1		77	25	1
Intervalle(±)		38	16	1		61	20	1
Émulsion+chaux								
Moyenne	22	385	284	42	24	402	244	48
Écart-type		59	20	2		66	18	2
Intervalle(±)		47	16	1		53	14	2
Mousse								
Moyenne	23	238	395	45	24	373	244	48
Écart-type		24	25	2		75	41	4
Intervalle(±)		19	20	2		60	33	3
Mousse+ciment								
Moyenne	22	476	259	40	24	516	211	45
Écart-type		103	30	2		106	28	2
Intervalle(±)		82	24	1		85	22	2
Mousse+chaux								
Moyenne	23	284	336	44	24	438	259	47
Écart-type		21	36	2		131	29	3
Intervalle(±)		17	29	2		105	23	3
Hi-tech								
Moyenne	25	429	325	39	28	336	293	48
Écart-type		200	46	2		73	42	2
Intervalle(±)		113	26	1		58	33	2

Les modules présentés semblent davantage cohérents. Cette observation est surprenante, car, dans le milieu de la caractérisation des chaussées, l'essai Dynaflect a généralement une meilleure réputation en ce qui a trait à la déflexion que pour les valeurs des modules obtenus. De plus, les valeurs présentées ne résistent pas totalement à une analyse la moindrement poussée. En effet, la fondation n'ayant pas été modifiée entre 1995 et 1996, on comprend mal pourquoi les modules sols obtenus pour 1995 sont plus élevés que ceux observés pour 1996. Normalement, c'est plutôt l'inverse qui est observé, car lorsque le sol support se densifie avec le temps, le module de la fondation augmente.

Toutefois, les modules chaussées présentés sont assez cohérents entre eux, même si les valeurs nous semblent très faibles pour des modules dynamiques. L'essai Dynaflect classe en 1995 les matériaux comme suit (les matériaux stabilisés avec de l'émulsion ont environ 2 semaines de cure, alors que les matériaux stabilisés avec de la mousse ont entre 5 et 7 jours de cure):

1. Mousse+ciment 476 MPa
2. Émulsion 450 MPa
3. Émulsion+ciment 414 MPa
4. Émulsion+chaux 385 MPa
5. Mousse+chaux 284 MPa
6. Mousse 238 MPa

On note une petite invraisemblance dans le classement pour les matériaux Émulsion et Émulsion+ciment. Le matériau Mousse+ciment se retrouve en première place (ce qui est logique, car ce matériau contenait 3% de ciment en 1995). L'essai au Dynaflect a décelé la faiblesse des planches Mousse et Mousse+chaux. Par conséquent, si la valeur très faible des modules dynamiques nous surprend, le classement obtenu par l'essai Dynaflect est très satisfaisant. Pour 1996, l'essai Dynaflect classe les matériaux comme suit (les planches stabilisées avec de l'émulsion ont environ 1 an de curage et celles stabilisées avec de la mousse de bitume ont environ 1 mois):

1. Mousse+ciment 516 MPa
2. Émulsion 452 MPa

3. Mousse+chaux 438 MPa
4. Émulsion+ciment 433 MPa
5. Émulsion+chaux 402 MPa
6. Mousse 373 MPa

On note que les matériaux stabilisés avec de la mousse ont de meilleures performances en 1996 qu'en 1995. Ceci est très logique, car non seulement les planches de 1995 ont démontré certaines faiblesses (c'est pourquoi on les a reconstruites), mais aussi parce que le temps de cure était nettement plus important en 1996 (environ 1 mois) qu'en 1995 (entre 5 et 7 jours selon la planche). Néanmoins, et à l'égard des résultats obtenus par les autres essais, le classement semble erroné. Toutefois, il est bon de remarquer (en tenant compte des intervalles de confiance) que les résultats entre la 2^{ème} et la 5^{ème} position ne sont pas statistiquement différents.

Il est difficile d'expliquer pourquoi l'essai au Dynaflect (principalement pour les déflexions calculées) n'a pas permis de bien caractériser ces matériaux les uns par rapport aux autres. Nous pouvons cependant émettre certaines hypothèses:

- Le logiciel utilisé par le CRCAC pourrait ne pas être adapté à la condition (type) de la chaussée testée. Cependant, cette hypothèse n'explique pas pourquoi les résultats relatifs au matériau Hi-tech ne sont pas très différents des autres, car ce matériau est très semblable à un béton bitumineux commun.
- L'appareil Dynaflect n'est possiblement pas un outil approprié pour caractériser une chaussée tel que celle testée (non recouverte par exemple). Cependant, et encore une fois, les résultats obtenus sur le matériau Hi-tech seraient alors différents, car ce matériau était très semblable à un enrobé bitumineux conventionnel, alors que l'on observe pas de véritables différences.
- La structure de chaussée serait possiblement trop rigide pour obtenir un bon résultat avec l'appareil Dynaflect (la force appliquée par le Dynaflect est relativement faible). Cependant, les résultats à la poutre Benkelman n'appuient pas cette hypothèse pour l'ensemble des matériaux.

Comme on le voit, aucune hypothèse n'explique véritablement bien les incohérences relevées dans les résultats obtenus avec le Dynaflect. Des analyses supplémentaires, c.-à-d. avec d'autres logiciels et d'autres corrélations, seraient nécessaires pour poursuivre cette discussion.

Il est finalement possible d'ajouter que le nombre d'essais (six) effectués par planche est un peu faible et qu'un nombre plus important permettrait d'avoir des valeurs moyennes plus précises. Nous avons calculé les intervalles de confiances pour 95% de certitude, mais en diminuant légèrement le degré de confiance à 90% et avec un nombre de 12 essais (au lieu de 6), l'intervalle de confiance aurait été < 50 MPa (ou un intervalle de confiance moyen d'environ 30 MPa) dans au moins 12 des 14 cas.

En conclusion sur cette section, l'essai au Dynaflect a permis d'estimer les tendances les plus marquées (Mousse+ciment très fort, Mousse 1995 et Mousse+chaux 1995 plus faibles), mais en terme de valeur absolue les modules et surtout les déflexions calculées varient peu. Par conséquent, une analyse strictement basée sur cet essai indiquerait des structures de chaussée relativement fortes (déflexion représentative faible) et ne permettrait pas vraiment d'établir une différenciation structurale des matériaux recyclés stabilisés.

8.2.4 Présentation et analyse des résultats à l'essai FWD

La firme Fondatec était responsable du traitement des essais au FWD. Le tableau 8.3 présentent les résultats moyens obtenus pour chacune des planches, l'écart-type et l'intervalle de confiance (calculé pour 95% de certitude).

Malheureusement, quelques essais ont été réalisés aux frontières de certaines planches. Ces résultats n'étant pas représentatifs du matériau correspondant, ceux-ci ont du être rejetés. Le nombre d'essai par planche n'est donc pas toujours le même (en fonction du nombre d'essai réalisés et rejetés). À cet égard, la précision est encore affectée par un nombre insuffisant d'essais. Les essais au FWD ont eu lieu le 3 novembre 1995 et le 3 octobre 1996. Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel Elmod qui utilise la méthode des épaisseurs équivalentes dite de

"Odemark" pour calculer la distribution des contraintes dans les sols. L'analyste n'était pas le même en 1995 et 1996.

Les résultats comparatifs pour les planches stabilisées avec de l'émulsion entre 1995 et 1996 semblent incohérents (le module de la planche Émulsion+chaux est plus que doublé). Bien que ces planches aient bénéficié d'un an de curage en 1996, ce facteur ne peut expliquer l'énorme différence observée. En effet, les planches avaient déjà en 1995 plus d'un mois de curage (ce qui est considérable). De plus, la température, de 12°C relevée en 1996 versus celle de 6°C observée en 1995, devrait favoriser les résultats de 1995 (qui sont en réalité plus faibles). Le phénomène de gel-dégel peut favoriser un gain de résistance (pour les premiers cycles de gel-dégel), mais on juge que son influence après un hiver ne peut permettre un gain de 100% dans les modules d'élasticité. On observe que le module de la fondation (module sol) est généralement moins élevé en 1995 qu'en 1996 (4 planches sur 7). De plus, il y a une différence importante dans le module sol entre les planches stabilisées avec de la mousse et celles stabilisées avec de l'émulsion en 1995. Cette variation est difficile à expliquer et n'est pas détectée dans les résultats de 1996.

On note également que les modules des planches Mousse et Mousse+chaux sont plus élevés en 1995 que ceux des planches Émulsion et Émulsion+chaux. Ce comportement n'est pas comparable avec celui observé dans tous les autres essais. Naturellement, la température très froide des relevés en 1995 a pu influencer de façon considérable les modules des planches Mousse et Mousse+chaux. Afin d'éliminer le plus possible "l'effet température" dans les résultats, nous avons appliqué certaines corrections sur les valeurs des modules obtenus de façon à calculer une valeur pour 15°C. Ces corrections sont basées sur les résultats présentés à la section 2.3.7. Ces corrections sont les suivantes pour chacune des planches:

1. Émulsion: 2,24%/°C entre 4,4 et 21,1°C. Correction basée sur la variation du module d'un gravier concassé stabilisé avec 5,5% (environ 3,5% de bitume total) d'émulsion SS-1h [KALLAS F., 1979].
2. Émulsion+ciment: 1,34%/°C entre 0 et 20°C. Correction basée sur les résultats publiés par la firme Colas pour une grave-Stabicol 90 (liant total environ 4%) [GODARD, 1991].

3. Émulsion+chaux: 2%/°C. Correction arbitraire influencée par celle imposée à la planche Émulsion.
4. Mousse 1995 et 1996: 3,0%/°C entre 4,4 et 21,1°C. Correction basée sur la variation du module d'un béton bitumineux contenant 6% de bitume (65 de pénétration) [KALLAS F., 1979] et les résultats publiés par Entreprise Jean Lefebvre pour une grave-mousse contenant 3,5% de bitume et 1% de chaux [GOACOLOU et coll., 1996] . Le matériau de cette planche contient 5,35% de bitume total.
5. Mousse+ciment 1995 et 1996: 1,34%/°C entre 0 et 20°C. Correction basée sur les résultats publiés par la firme Colas pour une grave-Stabicol 90 (liant total environ 4%) [GODARD, 1991].
6. Mousse+chaux: 2,5%/°C entre 4,4 et 21,1°C. Correction arbitraire influencée par celle imposée à la planche Mousse.

Tableau 8.3 Résultats à l'essai FWD

Planche	1995				1996			
	Nb essais	T°C	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)	Nb essais	T°C	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)
Émulsion								
Moyenne	5	6	1055	227	5	12	1799	211
Écart-type			239	50			248	28
Intervalle (±)			209	44			218	25
Émulsion+ciment								
Moyenne	4	6	1850	255	4	12	2454	267
Écart-type			962	108			621	18
Intervalle (±)			943	95			609	16
Émulsion+chaux								
Moyenne	4	6	892	180	4	12	1868	224
Écart-type			116	32			83	36
Intervalle (±)			114	28			81	32
Mousse								
Moyenne	3	6	1119	168	4	12	1194	230
Écart-type			440	10			187	20
Intervalle (±)			432	9			183	18
Mousse+ciment								
Moyenne	3	6	4630	175	4	12	3866	293
Écart-type			727	4			1248	40
Intervalle (±)			823	4			1223	35
Mousse+chaux								
Moyenne	4	6	1454	120	3	12	1680	203
Écart-type			470	6			358	14
Intervalle (±)			461	5			405	14
Hi-tech								
Moyenne	7	6	20308	248	7	12	19305	250
Écart-type			4724	66			5507	47
Intervalle (±)			4141	49			4827	35

7.

Tableau 8.4 Résultats au FWD corrigés pour une température de 15°C

Planche	1995 (MPa)		1996 (MPa)	
	Non corrigé 6°C	Corrigé pour 15°C	Non corrigé 12°C	Corrigé pour 15°C
Émulsion	1055	834	1799 (1 an)	1653
Émulsion+ ciment	1850	1608	2454 (1 an)	2336
Émulsion+ chaux	892	726	1868 (1 an)	1736
Mousse	1119	801	1194	1054
Mousse+ ciment	4630	4023	3866	3359
Mousse+ chaux	1454	1113	1680	1524

N.B.: Sauf indication contraire, les planches ont bénéficié approximativement d'un mois de cure

Évidemment ces corrections sont discutables. D'une part, elles n'ont pas été obtenues en laboratoire pour les matériaux testés sur les planches d'essais, mais bien pour des matériaux stabilisés relativement différents et non recyclés. De plus, les corrections établies sont imposées linéairement, ce qui est déjà une approximation grossière du comportement d'un module d'un matériau lié par du bitume en fonction de la variation de la température. Il faut aussi ajouter que la correction est établie à partir des valeurs de température de surface, et non en fonction d'une température moyenne sur toute l'épaisseur des matériaux. Finalement, certaines valeurs présentées ont été calculées en fonction de variations moyennes sur plus d'un matériau. Cependant, force est d'admettre que les corrections effectuées sont pour l'instant le seul outil de correction que nous ayons dans le cadre des matériaux recyclés stabilisés (en 1996). Il nous est donc apparu plus

logique d'effectuer ces corrections que de les omettre. Ces corrections et les résultats présentés dans le tableau 8.4 sont, en conséquence, à utiliser avec grande prudence.

Malgré ces corrections, les résultats de 1995 demeurent peu convaincants et incohérents à l'égard des tendances observées pour les autres essais. Pour toutes les raisons mentionnées, les résultats de 1996 nous semblent plus cohérents. L'essai au FWD classe les matériaux testés en 1996 selon l'ordre suivant (avec la température à 12°C):

1. Mousse+ciment 3866 MPa
2. Émulsion+ciment 2454 MPa
3. Émulsion+chaux 1868 MPa
4. Émulsion 1799 MPa
5. Mousse+chaux 1680 MPa
6. Mousse 1194 MPa

Malgré le nombre limité d'essais réalisés, ce classement nous apparaît très crédible. Il faut souligner que les planches stabilisées à l'émulsion ont bénéficié d'un an de cure (et ont subi un hiver), alors que le temps de cure pour les planches stabilisées avec la mousse est d'environ un mois (un peu plus). Les bassins de déflexion obtenus en 1995 pourront être réanalysés pour tenter de comprendre les incohérences observées.

Malgré la faible crédibilité associée aux valeurs provenant de l'analyse de 1995, il est intéressant de comparer les différences en pourcentage des planches stabilisées à l'émulsion entre 1995 et 1996. On remarque que les modules des planches Émulsion et Émulsion+chaux augmentent d'environ 100%, alors que le module moyen de la planche Émulsion+ciment n'augmente que de 45%. Cette observation est relativement en accord avec le constat, obtenu par les études de gel-dégel en laboratoire, qui indique une sensibilité accrue face aux conditions de gel des matériaux stabilisés avec ajout de ciment. Naturellement, cette hypothèse n'est qu'une des explications possibles. Toutefois, il faut souligner que les planches d'essais n'étaient pas recouvertes et que, conséquemment, les matériaux recyclés stabilisés sont susceptibles d'avoir subis plusieurs cycles de gel-dégel dans des conditions de saturation.

Les rapports fournis par la firme Fondatec ne présentaient pas de déflexion représentative calculée, mais tous les relevés étaient présentés en annexe. Il a donc été possible de calculer les déflexions maximales (1^{er} géophone) pour un chargement à 700 kPa. À partir des corrélations présentées par l'Alberta Transportation Utilities [BEGIN, 1987], les déflexions représentative ont été calculées (avec les résultats de 1996).

Tableau 8.4(a) Déflexion représentative en fonction de la déflexion maximale relevée au FWD

	Valeurs estrêmes	Nombre de valeurs	Déflexion moyenne 700 kPa (mm ⁻³)	Valeur Benkelman (mm ⁻²) Type de corrélation	
				FPC	Sol-ciment
Émulsion	272-393	5	330	74	
Émulsion+ciment	200-265	4	239	64	44
Émulsion+chaux	295-349	4	317	73	
Mousse	285-393	4	329	74	
Mousse+ciment	145-235	4	188	60	38
Mousse+chaux	358-410	3	378	77	

FPC: corrélation pour une chaussée recouverte avec fondation en pierre concassée

Sol-ciment: corrélation pour une chaussée recouverte avec fondation en sol-ciment

En observant les données, on peut remarquer qu'il y a peu d'écart, entre les valeurs à la poutre Benkelman calculées, lorsque la corrélation pour une chaussée recouverte de béton bitumineux avec une fondation en pierre concassée est utilisée pour toutes les structures de chaussée testées. Néanmoins, si on utilise une corrélation pour une chaussée avec une fondation en sol-ciment pour les matériaux stabilisés avec ajout de ciment, les différences sont beaucoup plus importantes. Naturellement, il n'existe aucune corrélation établie en fonction des types de structure testée dans

ce projet. En conséquence, il est impossible d'établir des valeurs véritablement crédibles de la déflexion maximale représentative, en fonction des résultats obtenus aux essais de type Dynaflect et FWD, pour le type de structure caractérisé.

8.2.5 Présentation et analyse des résultats à l'essai de plaque

Les essais effectués sur la fondation

Afin de pouvoir estimer l'apport structural relié aux matériaux recyclés stabilisés par l'essai de plaque, il fallait avoir préalablement caractérisé la fondation de pierre 0-40mm. Par conséquent, des essais de plaque ont été effectués sur la fondation (au mois août 1995) avant la mise en place des matériaux de surface. Cinq essais complets ont été réalisés sur ce matériau, mais les résultats du premier essai ont été éliminés, car la procédure n'a pu être respectée (pour cet essai) et les résultats correspondants en furent affectés significativement. Le tableau 8.5 présente les résultats obtenus pour les quatre autres essais. Les résultats complets des essais de plaque (sur la fondation et sur les matériaux recyclés stabilisés) sont présentés dans deux rapports remis au Laboratoire de la ville de Montréal [LUPHEN et coll., 1995][LUPHEN et coll., 1996]. Ces rapports sont disponibles au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke.

La méthode de calcul du module de réaction du sol "k" et du module d'élasticité statique "E" est brièvement expliquée à la section 8.1.3. Nous pouvons ajouter à ces explications que le calcul du module E, pour la pierre de fondation, a été effectué en supposant un milieu semi-infini, c.-à-d. que le module a été calculé comme si l'infrastructure et la pierre de fondation étaient identiques en terme de module élastique statique. Naturellement, cette hypothèse n'est pas rigoureusement vraie, mais puisqu'un minimum de 900 mm de pierre a été mis en place, l'influence de l'infrastructure a été jugée négligeable. De plus, les équations pour un chargement à l'aide d'une plaque rigide développées par Ullidtz (1987) [HUANG, 1993] avec un coefficient de poisson de 0,5 ont été utilisées pour calculer le module élastique (à l'aide des déflexions moyennes du 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} cycle obtenues lors des essais).

L'analyse des résultats permet de constater que, pour un même essai, il y a peu de variation des valeurs calculées, ce qui indique un comportement linéaire (pour la plage de contraintes

employées) du matériau de fondation. Devant cette constatation, les moyennes du module de réaction "k" et du module statique d'élasticité "E" ont été calculées à partir de tous les résultats disponibles, sans distinction du palier de chargement. Les valeurs représentatives sont respectivement 254 MPa/m et 332 MPa pour le module "k" et "E". Notons que les valeurs du module d'élasticité varient plus que celles du module de réaction.

**Tableau 8.5 Valeur du module "k" et "E"
pour la pierre de fondation 0-40 mm**

Essai	Charge (kPa)	Module de réaction "k" (MPa/m)	Module statique "E" (MPa)
#2			
	365	274	235
	714	277	238
	975	295	280
#3			
	365	172	234
	714	172	180
	975	168	186
#4			
	365	268	528
	714	286	571
	975	272	520
#5			
	365	304	369
	714	277	326
	975	283	319
Moyenne		254	332

On calcule généralement qu'une grave non traitée, c.-à-d. une pierre ou un gravier, peut atteindre 3 à 4 fois le module du sol-support sur lequel elle est compactée [RÉGIS, 1985]. On ne possède pas de données sur la portance du sol-support, mais on suppose qu'elle est relativement faible (mélange de matières organiques, terre et pierre concassée). Une valeur comprise entre 10 et 15 MPa pour le module de rigidité du sol-support serait probablement une bonne approximation

(CBR d'environ 3). Puisque la fondation de pierre a été compactée en 3 couches (3 à 4 couches selon la section) et en utilisant 12 MPa pour la rigidité du sol-support, on arrive par calcul à:

1^{ère} couche de pierre: $12 \text{ MPa} * 3,5 = 42 \text{ MPa}$

2^{ème} couche de pierre: $42 \text{ MPa} * 3,5 = 147 \text{ MPa}$

3^{ème} couche de pierre: $147 \text{ MPa} * 3,5 = 514,5 \text{ MPa}$

Par conséquent la valeur moyenne pour l'ensemble de la couche de pierre de fondation de 332 MPa semble plausible. Naturellement cette méthode de calcul est très approximative et il est évident qu'à partir d'un certain nombre de couche, il n'y a plus de véritable augmentation du module de rigidité.

Il est important de souligner que la valeur de 332 MPa obtenue pour la fondation est directement utilisée pour calculer la valeur du module d'élasticité statique des matériaux recyclés stabilisés. En conséquence, l'erreur sur cette valeur se répétera inévitablement dans une certaine mesure dans les résultats obtenus pour les matériaux recyclés stabilisés. L'intervalle de confiance avec 95% de certitude pour cette valeur est de $\pm 78 \text{ MPa}$, ou en pourcentage $\pm 23\%$. Ceci constitue à 95% de confiance l'erreur potentielle maximale pour le module E de la fondation. Cependant, l'utilisation des équations et abaques de Burmister n'implique pas que cette erreur soit transmise totalement au module calculé pour la couche subséquente (matériau recyclé stabilisé), car les abaques ne sont pas linéaires.

Les essais effectués sur les matériaux recyclés stabilisés: 1^{ère} campagne

Trois campagnes d'essais de plaque ont été effectuées sur les matériaux recyclés stabilisés. La première série d'essais a eu lieu à l'automne 1995, immédiatement après la construction des planches, du 29 septembre au 27 octobre inclusivement. En tout, 24 essais ont alors été réalisés, mais de ce nombre seuls les résultats de 17 essais ont été conservés. En effet, les conditions environnementales sévissant sur le site (vent puissant) provoquaient à l'occasion des mouvements dans le montage, rendant inutilisables certains résultats. Les relevés conservés ont été étudiés à la loupe, afin de pouvoir corriger le plus possible les anomalies provoquées par les micro-mouvements dans le montage. Les résultats conservés ont été jugés satisfaisants, mais il est évident que la précision des modules calculés pour cette série d'essais est inférieure à celle espérée.

Le tableau 8.6 présente les résultats moyens obtenus du module k et E pour les différents matériaux testés. Il indique aussi une température et le nombre d'essais conservés pour chacune des planches. La température est cependant assez approximative, car elle correspond à une moyenne non seulement pour tous les essais effectués pour une planche, mais également pour la durée d'un essai. En effet, selon le cas, un essai de plaque dure entre 2 et 4 heures. Par conséquent, la température n'est pas la même pour toute la durée de l'essai. Les températures indiquées sont donc présentées à titre indicatif. Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

Malgré le nombre très restreint d'essais, les résultats présentés sont assez cohérents. Il est bon de souligner qu'il y a beaucoup moins de variation dans les résultats pour le module " k " que pour le module " E ". Certaines valeurs (pour certains essais et certains paliers de chargement spécifiques) du module " E " ont été intentionnellement écartées lors du calcul des moyennes, car elles étaient de toute évidence erronées. L'obtention de certaines valeurs du module " E " trop élevées est reliée à la sensibilité des abaques de Burmister et à la précision des relevés de déflexion. En effet, une différence de 2 ou 3 centièmes de millimètre pour une déflexion (de l'ordre de 10 mm^2) sous une charge de 714 kPa entraîne une augmentation très élevée (facteur 5 ou davantage) du module " E ". Pour comparer les matériaux entre eux, nous utiliserons principalement les valeurs du module " k ". Ainsi les essais de plaque ont classé les matériaux recyclés stabilisés selon l'ordre suivant:

1. Mousse+ciment 1995 (épaisseur moyenne: 203 mm), gain (déduction du module "k" obtenu pour la fondation de la valeur obtenue pour l'ensemble de la chaussée) de 1042 MPa/m.
2. Émulsion+ciment (épaisseur moyenne: 192 mm), gain de 1030 MPa/m.
3. Émulsion (épaisseur moyenne: 168 mm), gain de 502 MPa/m.
4. Émulsion+chaux (épaisseur moyenne: 220 mm), gain de 348 MPa/m.
5. Mousse+chaux 1995 (épaisseur moyenne: 220 mm), gain de 77 MPa/m.
6. Mousse 1995 (épaisseur moyenne: 205 mm), gain de 62 MPa/m.

**Tableau 8.6 Résultats moyens obtenus à l'essai de plaque
à la campagne d'octobre 1995**

Planche	Température moyenne (°C)	Nombre d'essais conservés	Module de réaction "k" (MPa/m)	Module statique "E" (MPa)
Émulsion	8	2	756	704
Émulsion+ciment	12	3	1284	1935
Émulsion+chaux	13	2	602	769
Mousse	21	1	316	ip
Mousse+ciment	13	2	1296	2462
Mousse+chaux	8	2	331	ip
Hi-tech	12	5	486	1258

ip: inférieur à la pierre de fondation

Hi-tech n'est pas comparé aux autres planches, car il s'agit d'un matériau très différent. Il est important de souligner que ce gain en module "k" est directement relié à l'épaisseur des matériaux mis en place. Par exemple, il faudrait dire: "le gain de portance, en terme de module de réaction du sol, est de 1042 MPa/m pour 203 mm de matériau Mousse+ciment supplémentaire à la structure de chaussée testée (tous paliers de chargement confondus)". Puisque toutes les planches

n'ont pas exactement la même épaisseur, la comparaison est discutable. Néanmoins, les variations d'épaisseur ne sont pas très importantes, alors que les résultats démontrent entre eux des différences appréciables. Ainsi, trois groupes se distinguent véritablement:

1. Stabilisés avec ajout de ciment.
2. Stabilisés avec l'émulsion.
3. Stabilisés avec la mousse.

On peut noter que les matériaux 1995 stabilisés avec la mousse (Mousse et Mousse+chaux) obtiennent un module d'élasticité statique inférieur à la pierre de fondation, alors qu'ils obtiennent un gain de module "k". Il ne faut cependant pas croire à une erreur, car l'ajout de 200 mm de pierre aurait théoriquement permis un gain du module "k", (mais ce gain n'est malheureusement pas connu). Les planches stabilisées à la mousse et mousse+chaux étaient tellement peu portantes en 1995 qu'elles rupturaient (poinçonnement de la plaque dans le matériau) avec un chargement inférieur à 714 kPa.

Les essais effectués sur les matériaux recyclés stabilisés: 2^{ème} et 3^{ème} campagne

Lors de la deuxième campagne, toutes les planches construites en 1995 ont été testées par des essais de plaque à un seul palier de chargement (714 kPa). Ces essais de plaque, à un seul palier, permettent la détermination du module élastique statique "E", mais ne permettent pas d'obtenir le module de réaction du sol "k". Cette série d'essais a eu lieu au mois d'août 1996.

À la fin du mois d'août, les trois planches stabilisées avec de la mousse ont été détruites et reconstruites. La troisième campagne d'essais visait essentiellement à caractériser ces nouvelles planches. Trois essais de plaque complets (3 paliers de chargement) ont été réalisés pour chacune des nouvelles planches. Ces essais ont permis la détermination du module "E" et "k" pour chacun des paliers de chargement utilisés. Cette série d'essais a eu lieu entre le 17 et 20 septembre 1996 inclusivement. Cette fois les conditions environnementales ont été beaucoup plus clémentes et le montage avait été amélioré. Ainsi, les problèmes de micro-mouvements, subis en 1995, ont été beaucoup mieux contrôlés et la totalité des essais effectués lors des deux dernières campagnes ont été conservés.

Le tableau 8.7 présente les résultats obtenus lors de la deuxième campagne d'essais de plaque et les compare aux valeurs de la première série d'essais (effectuée en 1995). Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

Tableau 8.7 Résultats moyens comparatifs obtenus à l'essai de plaque pour les 1^{ère} et 2^{ème} campagnes

Planche	1995 (1 ^{ère} campagne)			1996 (2 ^{ème} campagne)		
	Temp. moy. (°C)	Nombre d'essais conservés	Module statique "E" (MPa)	Temp. moy. (°C)	Nombre d'essais	Module statique "E" (MPa)
Émulsion	8	2	704	25	2	531
Émulsion+ciment	12	3	1935	26	2	847
Émulsion+chaux	13	2	769	25	2	549
Mousse	21	1	ip	26	3	ip(211)
Mousse+ciment	13	2	2462	25	2	1175
Mousse+chaux	8	2	ip	25	2	ip(194)

ip: inférieur à la pierre de fondation

(E): module "E" global (fondation+matériau recylé stabilisé)

Un des objectifs visés par la deuxième campagne d'essai était de vérifier si les modules des planches Mousse 1995 et Mousse+chaux 1995 avaient augmenté. Selon les résultats obtenus, il semble évident que la situation de ces planches ne s'est pas améliorée de façon significative. On remarque également que les modules des autres planches ont diminué. Cependant, la température était beaucoup plus élevée lors des essais de la deuxième étape et ceci peut expliquer en grande partie cette baisse des modules moyens observée. Les corrections des modules, en fonction de la température, présentées à la section 8.2.4 ont également été appliquées aux modules obtenus à l'essai de plaque pour les planches stabilisées à l'émulsion et la planche Mousse+ciment. La plage

de température étant cependant plus importante que celle observée à l'essai FWD, voici les modifications effectuées aux pourcentages de correction:

1. Émulsion: 2,24%/°C entre 4,4 et 21,1°C et 1,79%/°C entre 21,1 et 37,8°C. Correction basée sur la variation du module d'un gravier concassé stabilisé avec 5,5% (environ 3,5% de bitume total) d'émulsion SS-1h [KALLAS F., 1979].
2. Émulsion+ciment: 1,34%/°C entre 0 et 30°C. Correction basée sur les résultats publiés par la firme Colas pour une grave-Stabicol 90 (liant total environ 4%) [GODARD, 1991].
3. Émulsion+chaux: 2%/°C entre 4,4 et 21,1°C et 1,5%/°C entre 21,1 et 37,8°C. Correction arbitraire influencée par celle imposée à la planche Émulsion.
4. Mousse+ciment 1995 et 1996: 1,34%/°C entre 0 et 30°C. Correction basée sur les résultats publiés par la firme Colas pour une grave-Stabicol 90 (liant total environ 4%) [GODARD, 1991].

Les températures obtenues en 1995 sont celles observées dans la masse des matériaux (grâce à des thermocouples), mais celles présentées pour 1996 correspondent à la température ambiante à l'ombre. Il faut donc supposer que la température dans la masse des matériaux était semblable à la température ambiante à l'ombre. Il y avait peu de variation de température lors de ces essais, mais le soleil (omniprésent) a sans doute fait augmenter un peu la température des matériaux. Les modules corrigés en fonction de la température sont présentés au tableau 8.8. Les modules pour les matériaux Mousse et Mousse+chaux n'ont pas été inclus, car ces données n'étaient pas utilisables (module "E" inférieur à la pierre).

**Tableau 8.8 Modules élastiques statiques
corrigés pour 15°C, 1^{ère} et 2^{ème} campagne**

	Module élastique statique corrigé pour 15°C (MPa)	
	1995	1996
Émulsion	584	660
Émulsion+ciment	1842	993
Émulsion+chaux	731	664
Mousse+ciment 1995	2381	1378

Il est intéressant de remarquer que les baisses de module après un hiver sont systématiquement plus élevées avec les matériaux avec ajout de liant hydraulique (principalement le ciment). Néanmoins, il est possible que, lors de la 1^{ère} campagne d'essais, les modules des matériaux stabilisés avec ajout de ciment aient été significativement surévalués à cause des problèmes rencontrés et de la sensibilité des abaques de Burmister. Toutefois, on se rappellera que l'augmentation des modules avec l'essai FWD (entre 1995 et 1996) avaient été moindre avec l'émulsion+ciment que pour les autres planches stabilisées avec de l'émulsion. Par conséquent, ces deux observations abondent dans le même sens.

Il faut également ajouter que les modules obtenus à l'essai de plaque sont susceptibles d'être beaucoup plus influencés par la température que les modules dynamiques. En effet, la déflexion sous l'application d'une charge statique est fonction à la fois de la déformation élastique du matériau et d'un fluage viscoélastique. Ce fluage est relié au comportement du bitume sous charge statique et est très influencé par la température. Les corrections des modules ayant été établies en fonction de variations de modules dynamiques, il est probable que les pourcentages utilisés pour corriger les modules statiques E ne soient pas assez élevés.

Le tableau 8.9 présente les résultats moyens obtenus à la troisième campagne d'essais de plaque et les compare à ceux obtenus lors de la première. Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante. On remarque que les nouvelles planches stabilisées avec de la mousse performant mieux que celles construites initialement. Les modules élastiques statiques demeurent cependant inférieurs à ceux obtenus avec les planches stabilisées avec l'émulsion de bitume. La différence est moins importante pour les modules de réaction du sol "k". Le matériau stabilisé à la mousse demeure toutefois le plus faible à cet égard, et cette remarque est d'autant plus véridique que cette planche était surdimensionnée (épaisseur moyenne de 270 mm de matériau stabilisé à la mousse). L'augmentation de portance de la mousse de bitume avec un ajout de ciment (1,5% en 1996 selon les spécifications de l'entrepreneur) est impressionnante, car ce matériau possède à la fois un excellent module élastique (faible déformation sous chargement) et le meilleur module de réaction du sol "k" (déformation résiduelle faible ou pourcentage de rebondissement élastique très élevé).

Tableau 8.9 Valeurs comparatives du module "E" et "k"
1^{ère} et 3^{ème} campagne

Planche	Moyenne 1995 (tous niveaux de chargement et essais confondus)			Moyenne 1996 (tous niveaux de chargement et essais confondus)		
	T°C	E (MPa)	k (MPa/m)	T°C	E (MPa)	k (MPa/m)
Mousse	21	ip	316	17	336	510
Mousse+ciment	13	2462	1296	14	2090	2376
Mousse+chaux	8	ip	331	17	375	649
Émulsion	8	704	756			
Émulsion+ciment	12	1935	1284			
Émulsion+chaux	13	769	602			

ip: inférieur à la pierre

8.2.6 Discussion

Les renseignements obtenus grâce au projet des planches d'essais sont très précieux. Malheureusement, les répétitions pour chacun des essais, et principalement pour les essais dynamiques tels Dynaflect et FWD, ont été trop peu nombreuses. Cette lacune ne nous a pas permis d'effectuer une analyse en profondeur et nous restreint dans la possibilité de présenter des valeurs de référence précises. Néanmoins, tous conviendront que ce laboratoire de terrain nous offre une aide sans égale dans la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés au Québec.

La condition non circulée des structures de chaussées testées semble avoir eu une influence peu désirable et significative sur les résultats de l'essai à la poutre Benkelman. Dans ce contexte, il est difficile de juger des valeurs obtenues avec cet essai, car le résultat Benkelman ne permet pas l'obtention de mesures analytiques (tel un module élastique). Ce type d'essai devrait être davantage utilisé sur les chaussées réhabilitées avec les matériaux testés dans la ville de Montréal que sur les planches d'essais construites au CTED.

Les résultats à l'essai Dynaflect sont quelque peu décevants, mais ils ne sont pas dénués de sens. En effet, ces derniers ont permis d'établir les grandes tendances observées. Les écarts observés entre les différentes planches, principalement pour la déflexion calculée, et l'ordre de grandeur des modules sont très faibles. Il n'a pas été possible d'identifier le problème (ou s'il y en avait véritablement un). En conséquence, les résultats Dynaflect doivent être utilisés avec grande prudence avec les matériaux recyclés stabilisés. Une vérification du potentiel de cet essai sur de véritables chaussées devrait être menée (en comparant les résultats Dynaflect avec ceux de d'autres essais).

Les valeurs obtenues avec le FWD nous semblent de qualité variable. À cet égard, l'étude effectuée en 1996 présente davantage de cohérence que celle réalisée en 1995. L'ordre de grandeur des modules au FWD est beaucoup plus crédible que celui obtenu avec l'essai Dynaflect. Nous déplorons le nombre insuffisant d'essais par planche effectué. Malgré cette lacune, ce sont les résultats moyens des modules dynamiques obtenus au FWD en 1996 que nous conservons comme valeur de référence à 15°C:

1. Émulsion environ 1600 MPa.
2. Émulsion+ciment environ 2400 MPa.
3. Émulsion+chaux environ 1600 MPa.
4. Mousse environ 1000 MPa.
5. Mousse+ciment environ 3500 MPa.
6. Mousse+chaux environ 1500 MPa.

Il est important de souligner que les modules présentés pour les matériaux stabilisés avec la mousse sont reliés aux planches construites en 1996. Toutefois, tous ces modules correspondent vraisemblablement aux valeurs à long terme, car les matériaux stabilisés à la mousse sont reconnus pour curer plus rapidement que ceux stabilisés à l'émulsion.

Certaines difficultés ont diminué la précision des essais de plaque en 1995 et le nombre d'essais est relativement faible. Cette situation (nombre d'essais faible) est cependant davantage compréhensible avec l'essai de plaque qui demande environ 3 heures à réaliser, alors que les essais dynamiques nécessitent 30 secondes. Malgré tout, les résultats obtenus sont relativement cohérents et crédibles. Naturellement, les modules d'élasticité statiques ne sont pas égaux à ceux observés avec l'essai FWD. C'est très normal, car les deux groupes de modules sont obtenus avec des chargements de type très différents.

En utilisant les modules déterminés en 1996, il est possible de recommander les valeurs suivantes pour un module élastique statique à 15°C:

1. Émulsion environ 650 MPa.
2. Émulsion+ciment environ 1000 MPa.
3. Émulsion+chaux environ 650 MPa.
4. Mousse environ 350 MPa.
5. Mousse+ciment environ 1400 MPa.
6. Mousse+chaux environ 400 MPa.

Si on calcule un ratio (module dynamique/module statique), avec les valeurs proposées, on retrouve toujours un ratio approximatif de 2,5, sauf pour les matériaux Mousse+chaux et Mousse qui présente des ratios respectifs de 3,75 et 2,85. Ces deux matériaux sont ceux où le bitume a la plus grande influence sur les propriétés mécaniques, car le dosage en nouveau bitume est de 3% pour les matériaux stabilisés avec la mousse, comparativement à 1,5% pour ceux stabilisés avec l'émulsion. Pour la fondation en pierre, ce ratio est inférieur à 1.

Les résultats obtenus n'ont pas permis, pour diverses raisons, la démonstration sans équivoque de la sensibilité accrue des matériaux stabilisés avec ajout de ciment soumis aux conditions de gel. Cependant, certaines observations semblent indiquer la susceptibilité de cette classe de matériau spécifique face aux cycles de gel-dégel. Une étude sérieuse sur le sujet serait particulièrement intéressante.

8.3 Essais au FWD sur le boulevard Lemire à Drummondville

8.3.1 Introduction

Plusieurs études sur le terrain ont été effectuées sur le boulevard Lemire avant et après sa réfection. Très peu cependant sont présentées dans le cadre de ce mémoire. Néanmoins, l'analyse structurale du boulevard après sa réfection a été réalisée à deux reprises avec l'appareil FWD. Ces résultats sont particulièrement intéressants, car une section d'essai (longue de 150 m) avait été stabilisée au CSS-1 plutôt qu'avec le Stabicol 90. Par conséquent, il est possible, dans le contexte d'une véritable réfection par pulvérisation-stabilisation en place, d'observer la différence de portance d'une stabilisation à l'émulsion de bitume conventionnelle et d'une stabilisation au Stabicol 90 (émulsion de bitume et ciment). Notons que le granulat stabilisé était identique et que l'équipement de pulvo-stabilisation utilisée était le même pour les deux liants. La quantité moyenne de liant épandu variait peu entre les deux stabilisants. Les deux séries d'essais au FWD ont été traitées par la firme Fondatec. Comparativement aux planches d'essais, la structure caractérisée est beaucoup plus classique, c.-à-d. que la stratigraphie de la chaussée est relativement normale (revêtement bitumineux, matériau recyclé stabilisé, matériau pulvérisé et sous-fondation de pierre et de sable). Cette caractéristique permet à l'analyste de fixer un module pour le pavage (en fonction de sa température de surface). Par le fait même, la confiance accordée aux résultats ou à la précision s'en voit augmentée.

La première campagne de relevés au FWD a eu lieu le 8 septembre 1995, soit environ 3 semaines après la fin des travaux. Le matériau stabilisé au CSS-1 avait bénéficié de 23 jours de cure (7 jours non recouverts et 16 jours recouverts par le pavage), alors que le nombre de jours de cure variait de 23 à 32 pour le matériau stabilisé au Stabicol (nombre de jours non recouverts entre 2 et 7 jours). La température de surface a varié durant la période d'essai de 10 à 20°C.

La seconde campagne de relevés a été réalisée le 8 octobre 1996, soit plus d'un an après la fin des travaux. La température de surface a peu varié lors de cette série d'essai, elle se situait à 5°C. Notons que le module du pavage était ajusté (correction) en fonction de la température de surface.

8.3.2 Présentation et analyse des résultats

Le tableau 8.10 présente les résultats moyens obtenus lors des deux campagnes de relevés, en fonction du type de stabilisant utilisé et de la direction de la circulation. Il y a eu 9 relevés par direction pour le matériau stabilisé au CSS-1 et environ 35 relevés par direction pour celui stabilisé au Stabicol. Il est important de noter que certaines valeurs ont été éliminées lors du calcul de la moyenne. En effet, quelques modules présentés étaient soit beaucoup trop élevés, soit très faibles. Il est possible en milieu urbain d'effectuer un essai au FWD à proximité d'un obstacle, tel une canalisation ou autres. Le résultat peut alors être influencé et peut différer grandement des autres. De plus, avec une stabilisation en place, il est possible que certaines zones n'aient pas été véritablement stabilisées. Dans ce dernier cas, il est normal que le module soit très bas. Finalement, dans certains cas, l'épaisseur de pavage et/ou de la stabilisation n'a possiblement pas été bien contrôlée. Puisque les épaisseurs de chacune des couches ne sont pas déduites par l'appareil, mais qu'elles sont entrées par l'analyste en fonction des épaisseurs supposées, le résultat peut alors être très influencé par ce genre de situation. Les résultats complets sont présentés en annexe à la section correspondante.

On remarque que les valeurs des modules pour les matériaux stabilisés sont en général supérieures dans la direction Sud, alors que les modules de l'infrastructure sont supérieurs dans la direction Nord. Il est possible que les épaisseurs réelles moyennes de chacune des couches varient un peu en fonction de la direction. Ceci expliquerait cette légère différence. On remarque également que les modules moyens de 1996 sont tous plus élevés (stabilisés et infrastructure) que ceux de 1995. Cette observation est en parfait accord avec la théorie de la densification (compaction post-construction) des matériaux granulaires de fondation (et du sol-support) et de la cure des matériaux recyclés stabilisés.

Tableau 8.10 Résultats moyens obtenus au FWD
Boulevard Lemire, Stabilisation au CSS-1 et Stabicol

Stabilisation	Direction	Module moyen 1995 (MPa)		Module moyen 1996 (MPa)	
		Stabilisé	Infrastructure	Stabilisé	Infrastructure
CSS-1	Nord	799	151	882	212
	Sud	916	130	1328	135
Moyenne		858	141	1105	174
Stabicol	Nord	1741	138	2163	162
	Sud	1871	122	2087	130
Moyenne		1806	130	2125	146

On note aisément que la portance du matériau stabilisé au Stabicol est supérieure à celle du matériau stabilisé au CSS-1. En fait, les modules obtenus par le matériau stabilisé au Stabicol équivalent à 210% et 192% de ceux obtenus avec le matériau stabilisé au CSS-1 pour 1995 et 1996. Il faut cependant remarquer que lors des relevés de 1995, le matériau stabilisé au CSS-1 avait bénéficié d'un temps de cure inférieur et que ce matériau nécessite une période de cure plus importante que l'autre type de stabilisation. Néanmoins, les modules de portance du matériau stabilisé au Stabicol sont approximativement du double de ceux mesurés pour le matériau stabilisé au CSS-1. Le module moyen de ce dernier matériau a augmenté de 28,8% durant l'année de cure, alors que celui relatif au Stabicol s'est haussé de 17,6%. Il est difficile d'analyser ces hausses de modules, car plusieurs phénomènes influencent ce paramètre: cure, gel-dégel, taux d'humidité, cycle de séchage-mouillage etc.

Les résultats obtenus sont relativement en accord avec ceux obtenus sur les planches d'essais pour les matériaux Émulsion et Émulsion+ciment (au FWD). Surtout si l'on tient compte que les matériaux des planches d'essais ont été fabriqués en centrale (meilleur contrôle), et que les conditions de cure (pour la planche Émulsion) ont été exceptionnelles (aucun pavage). Il faut aussi considérer que le granulat utilisé était nettement différent.

Même si nous n'avons pas présenté les variations dans les résultats, le lecteur pourra facilement se faire une idée de ce paramètre en regardant les résultats en annexe. La variation dans les résultats obtenus pour le matériau stabilisé au CSS-1 (une fois les modules divergents éliminés) est très respectable. Celle observée avec le matériau stabilisé au Stabicol est plus élevée. Ceci peut facilement être expliqué par les conditions de chantier. En premier lieu, les résultats relatifs au matériau stabilisé au CSS-1 proviennent d'une section unique, construite à la toute fin du projet (expérience accrue, meilleur contrôle, etc.). Cette section a bénéficié d'une attention particulière due à l'égard de son utilité et de sa fonction (recherche et développement). D'autres part, les relevés effectués sur le matériau stabilisé au Stabicol ont été effectués sur la longueur totale de la réfection. Il a été reconnu que des difficultés ont été rencontrées dans l'exécution de certaines sections (début du projet, mauvaise pulvérisation, épaisseur d'intervention mal contrôlée etc.). Par conséquent, il est normal dans ces conditions de retrouver une variation plus importante dans les résultats avec le matériau stabilisé au Stabicol.

Il est également intéressant de remarquer l'excellente concordance entre les résultats de laboratoire et les relevés effectués au FWD. En effet, les essais mécaniques ont révélé des performances nettement supérieures pour le matériau stabilisé au Stabicol. En fait, la règle *approximative* du facteur 2 (2 fois plus de résistance en tension, Marshall, CBR, module etc.) semble s'appliquer autant aux résultats de laboratoire qu'à ceux obtenus sur le chantier.

À partir des résultats obtenus à Drummondville, il serait maintenant très intéressant de poursuivre le suivi durant plusieurs années (plus de cinq ans), afin de pouvoir vérifier les tendances présentement observées en laboratoire sur la sensibilité face aux conditions de gel-dégel des matériaux stabilisés.

8.4 Discussion

Les essais effectués sur les planches d'essais et sur le boulevard Lemire ont permis d'établir des comparaisons sur la portance de plusieurs types de matériaux stabilisés. L'ajout de ciment permet d'augmenter de façon considérable le module de portance des matériaux stabilisés avec du bitume (émulsion, mousse). Ce gain, relativement important, permet sans aucun doute d'étendre la méthode de réfection par pulvo-stabilisation aux chaussées fortement circulées. Cet ajout permet également de recouvrir le matériau stabilisé plus rapidement, et de rendre ce dernier moins vulnérable aux mauvaises conditions de température. Le gel demeure toutefois un ennemi potentiel pour ce type de matériau. Ce point demande davantage d'étude avant de pouvoir statuer sur sa véritable influence dans la réalité.

L'ajout de chaux ne semble pas influencer de façon significative la portance des matériaux stabilisés avec du bitume. Néanmoins, l'ajout de chaux n'est généralement pas utilisé pour jouer ce rôle, mais bien pour contrôler une présence de particule fine trop importante.

Même si le coût relié à l'utilisation du FWD est significativement plus élevé que celui associé au Dynaflect, le FWD demeure le meilleur choix pour caractériser la portance des chaussées. La procédure d'analyse en fonction du type de chaussée testée et les logiciels utilisés devraient néanmoins être réglementés, car le programme SHRP a prouvé que ces facteurs influencent significativement les résultats [RADA et coll., 1992a et 1992b].

Chapitre 9. L'essai au pénétromètre dynamique

9.0 Introduction

Qu'ils soient fabriqués en centrale ou sur place, les matériaux recyclés stabilisés nécessitent un certain temps de curage avant leur recouvrement par le pavage. Ce temps de cure est nécessaire afin que le matériau recyclé stabilisé atteigne le plus rapidement possible une portance adéquate, sans quoi la structure de la chaussée pourrait subir une dégradation très rapide en fonction du trafic dans les premières semaines (ou mois) d'utilisation. Il existe peu de moyens de vérifier le niveau de portance, ou le gain de portance, de ces matériaux avant le recouvrement. Bien entendu, il est possible d'utiliser l'essai Dynaflect ou FWD pour caractériser la portance de la chaussée durant cette période de cure, mais leur utilisation comporte des inconvénients non négligeables. D'une part, le coût relié à ces essais est pour l'instant beaucoup trop élevé, d'autre part, l'obtention des modules de portance demande un traitement par ordinateur ce qui prend un certain temps et demande une expertise assez importante.

Certaines administrations routières en France et aux États-Unis spécifient un temps de cure minimum (habituellement 14 jours pour une stabilisation à l'émulsion de bitume) dans les devis (souvent la circulation est défendue pendant cette période sur les voies réhabilitées). Le taux de curage étant influencé autant par les conditions environnementales que par la durée, la période de cure peut alors être augmentée ou légèrement diminuée selon la météo sévissant durant ce temps de curage. Cette méthode est assez efficace, mais elle ne permet pas d'optimiser à la fois la qualité de la réfection et la durée des travaux. De plus, cette méthode ne permet pas de vérifier sur le chantier l'homogénéité (au niveau de la portance) de la couche de matériau stabilisé.

L'utilisation de liant mixte dans la stabilisation réduit tellement le temps de curage nécessaire que ce problème ne se pose plus. En effet, 24 à 48 heures suffisent généralement à ces liants pour développer une bonne résistance. De plus le phénomène d'évaporation n'est pas jugé très important dans le processus de cure avec ces liants. Néanmoins, il serait intéressant de vérifier, avant la mise en place du revêtement, l'homogénéité du matériau au niveau de sa portance, car une fois cette opération complétée il est impossible d'apporter des corrections au matériau stabilisé.

Par conséquent, la disponibilité d'un essai capable d'estimer les modules de portance des matériaux recyclés stabilisés de façon ponctuelle, simple et peu coûteuse serait très utile pour le contrôle en chantier de ceux-ci.

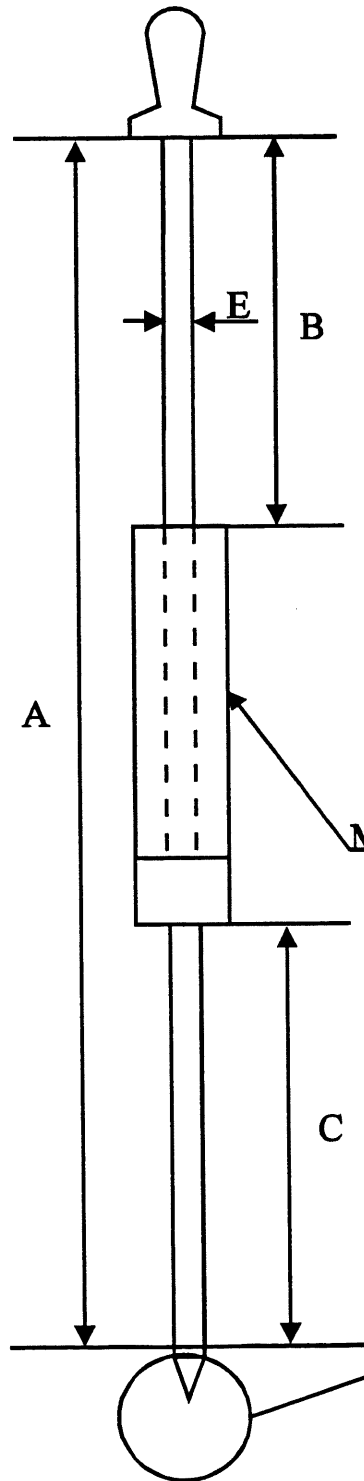
9.1 Le pénétromètre dynamique

9.1.1 Historique et généralités

À la ville de Montréal on utilise depuis nombre d'années un outil communément nommé "pénétromètre" pour vérifier le niveau de compaction de la pierre concassée dans les tranchées. La figure 9.1 présente l'outil et les spécifications qui s'y rattachent. Notons que cet appareil a été développé dans le système impérial, c'est pourquoi les dimensions données en métrique sont quelque peu loufoques.

Les ingénieurs responsables des projets de réfection utilisant les matériaux recyclés stabilisés au Laboratoire de la ville de Montréal, M. Richard Morin et M. Pierre-Paul Légaré, eurent l'idée d'utiliser cet outil sur ces matériaux. Les premiers résultats furent encourageants, car l'essai est sensible au curage des matériaux recyclés stabilisés. Le mandat entre le Laboratoire de la ville de Montréal et le Département de Génie Civil de l'Université de Sherbrooke a permis d'investiguer de façon plus approfondie le potentiel du pénétromètre. Cette investigation a d'abord été menée sur des chantiers à Montréal, mais les résultats les plus intéressants proviennent des essais réalisés sur les planches d'essais (chapitre 8). De plus, il a été possible de réaliser des essais au pénétromètre sur le chantier de réfection du boulevard Lemire à Drummondville (matériau stabilisé en place à l'aide du liant Stabicol).

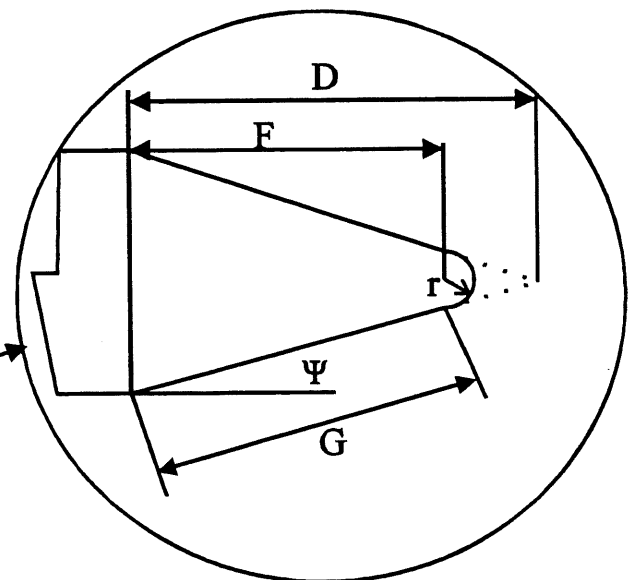
Figure 9.1 Pénétrromètre



Cote	Dimension (cm)	Tolérance (cm)
A	145,51	0,64
B	45,72	0,32
C	45,72	0,32
D	4,72	0,08
E	2,54	0,013
F	3,18	0,08
G	3,38	0,08
r	0,41	0,03

Angle	Degré	Tolérance
ψ	15	1

Description	Poids (kg)	Tolérance
Marteau	4,54	0,045
Pénétrromètre	11,79	0,23



9.1.2 Procédure d'essai

L'utilisation du pénétromètre, aussi nommé pénétromètre dynamique, est vraiment simple. En effet, il s'agit simplement de faire coulisser le marteau vers le haut et de le laisser tomber (en maintenant le pénétromètre perpendiculaire au sol). L'impact produit tend à faire pénétrer la pointe dans le matériau. En fonction de cette action, deux procédures peuvent être utilisées:

1. Déterminer la profondeur de pénétration pour un nombre fixé de coups de marteau.
2. Déterminer le nombre de coups de marteau pour une profondeur de pénétration donnée.

L'utilisation du pénétromètre pour contrôler le niveau de compaction de la pierre dans les tranchées utilise la première méthode. Dans le cadre du contrôle des matériaux recyclés stabilisés, la seconde procédure fut préférée. En effet, il est supposé qu'un matériau stabilisé à l'émulsion de bitume possède à jeune âge un gradient de résistance en fonction de la profondeur (provoqué par une teneur en eau différentielle de la surface vers la base du matériau). Par conséquent, le pénétromètre pouvait être en mesure de percevoir ce gradient de résistance et c'est pourquoi la seconde procédure fut employée en notant le nombre de coups de marteau pour différentes profondeurs de pénétration.

9.1.3 Objet et contexte d'études

L'objectif ultime est d'estimer le potentiel de cet essai à déterminer le temps opportun du recouvrement des matériaux recyclés stabilisés. Deux avenues semblent possibles pour parvenir à cet objectif. La première consiste à établir des corrélations entre le résultat de l'essai pénétromètre et les modules des matériaux. Si de telles corrélations pouvaient être élaborées et qu'elles s'avéraient assez précises, cet essai pourrait être utilisé pour déterminer le temps de recouvrement, pour vérifier les hypothèses de conception (coefficients structuraux) reliées à la portance des matériaux recyclés stabilisés et, finalement, pour établir des comparaisons solides entre les divers matériaux fabriqués.

La seconde avenue est d'établir un gain net de résistance (en terme de résultats à l'essai du pénétromètre dynamique) visé et de recouvrir le matériau recyclé stabilisé lorsque cet objectif de cure est atteint. Par exemple, si le résultat au pénétromètre dynamique initial (immédiatement après la compaction du matériau stabilisé) pour une pénétration de "x mm" est " y_1 coups de marteau", et que l'on vise une augmentation de "Z" coups de marteau, on pourra recouvrir le matériau stabilisé au temps "f" lorsque " $(y_f - y_1) = Z$ ", où y_f correspond au nombre de coups de marteau au temps "f" pour "x mm" de pénétration. Une augmentation de résistance en terme de pourcentage est aussi envisageable, mais un tel système est très influencé par la valeur initiale de résistance. Or ce résultat initial caractérise la résistance à la pénétration du granulat, alors que le gain de résistance est davantage relié à la cure du liant. Il est donc préférable d'utiliser le concept de gain de coups de marteau net.

Avant d'élaborer véritablement sur l'une ou l'autre des deux options proposées, certains paramètres devaient être étudiés. En premier lieu, afin que l'outil soit jugé efficace, il fallait vérifier dans quelle mesure ce dernier pouvait percevoir l'évolution de la cure. De plus, il nous apparaissait important d'estimer le potentiel et les limites d'utilisation de l'essai. Finalement, une étude serait véritablement jugée satisfaisante dans l'optique où plusieurs matériaux recyclés stabilisés déjà caractérisés pourraient être testés, de façon à pouvoir comparer les divers résultats entre eux. Le projet des planches d'essais au CTED présenté au chapitre 8 et institué par le Laboratoire de la ville de Montréal nous a permis d'obtenir ces conditions préalables.

9.1.4 Réalisations

L'outil fut utilisé dans un cadre de recherche pour la première fois sur le chantier de réfection du boulevard Lemire à Drummondville sur le matériau stabilisé au Stabicol, quelques essais sur le matériau stabilisé au CSS-1 (il y avait une section sur le boulevard Lemire qui était stabilisée au CSS-1) furent également réalisés.

Ensuite, l'essai au pénétromètre dynamique fut employé de façon très intensive sur les planches d'essais construites au CTED de la ville de Montréal à l'automne 1995 sur six matériaux recyclés stabilisés: émulsion, émulsion+ciment, émulsion +chaux, mousse de bitume, mousse+ciment et mousse+chaux. Tous les matériaux recyclés stabilisés ont été fabriqués en centrale. Pour plus d'informations sur la caractérisation des planches, voir section 8.2.1. Malheureusement, les planches stabilisées avec de la mousse de bitume devaient démontrer des problèmes de construction (début de cure sous une pluie forte, pierre schisteuse, etc.) et elles ont dû être reconstruites à l'été 1996. Finalement, d'autres essais au pénétromètre ont été effectués à l'été 1996 sur les anciennes planches stabilisées à l'émulsion et sur les nouvelles planches stabilisées avec la mousse de bitume. Il est bon de noter que tous les résultats de ces essais ont été obtenus pour différentes pénétrations (de façon générale un essai compilait un triple résultat, c.-à-d. un résultat pour 6,35 cm, un autre pour 12,7 cm et un dernier pour 15,25 cm de pénétration)

9.1.5 Constatations préliminaires

Sans effectuer d'analyse approfondie sur les résultats obtenus à l'essai au pénétromètre, il était déjà possible de faire ressortir certains points:

- L'essai percevait très bien l'augmentation de portance (la cure) des matériaux étudiés. Cette constatation supportait également la comparaison entre les divers matériaux testés, c.-à-d. que le taux d'augmentation était, par exemple, supérieur pour les matériaux stabilisés avec un ajout de ciment.
- Une friction peu désirable semblait se développer entre la tige et le matériau testé, cette friction était négligeable à très jeune âge, mais son influence augmentait à partir d'un certain laps de temps (ou d'un certain niveau de curage).
- À partir d'un certain niveau de résistance, il semble que l'énergie transmise par le marteau atteint une limite d'efficacité, et que le résultat de l'essai ne veut pas dire grand chose mis à part que le matériau a développé une résistance très élevée à la pénétration.

- La variation dans les résultats est assez importante et le coefficient de variation semble augmenter avec l'avancement de la cure. Cette variation n'est cependant pas plus importante que celle obtenue avec les essais de type Dynaflect ou FWD.

D'autres constatations d'ordre pratique méritent également d'être mentionnées:

- L'outil n'est pas très ergonomique. À la longue, il provoque des maux aux épaules et au cou. De plus, si on ne porte pas de protection aux oreilles, le bruit très aigu du marteau peut causer des dommages permanents à l'ouïe.
- Si au début l'essai ne prend pas beaucoup de temps (2 ou 3 minutes par essai), après 100 ou 200 heures de cure, il faut compter une quinzaine de minutes minimum par essai, car l'épuisement gagne l'opérateur inévitablement et le nombre de coups augmente rapidement.

Malgré certaines remarques négatives, l'ensemble des résultats était très encourageant et une analyse plus approfondie s'imposait.

9.1.6 Rapport d'analyse statistique

En juin 1996, un rapport [BONIN et coll., 1996a] a été produit afin d'analyser de façon plus approfondie le potentiel de l'outil et l'efficacité de la procédure employée. L'analyse contenue dans ce rapport utilisait une partie des résultats provenant de la campagne d'essais de l'automne 1995 sur les planches d'essais. Ces résultats étaient ceux obtenus sur les planches "émulsion", "émulsion+ciment" et "émulsion+chaux". Ces trois planches n'ont pas été choisies au hasard. En effet, leur choix comportait d'importants avantages. En premier lieu, les trois planches ont été construites par le même entrepreneur, la même matinée, avec le même matériau recyclé (seul le stabilisant est différent) et avec le même équipement que celui utilisé lors de réfection de routes. De plus, ces trois planches ont été celles où il y a eu le meilleur contrôle au niveau de l'épaisseur et du degré de compaction lors de la pose des matériaux. L'ensemble de ces faits diminue, selon toute vraisemblance, le nombre de facteurs qui influencent la variation dans les résultats. Par exemple, le résultat d'un essai de pénétration est probablement influencé par la granulométrie du

matériau. Dans notre cas, la granulométrie était identique pour les trois planches testées. D'autre part, l'environnement de cure fut identique en tout temps pour les trois planches puisqu'elles furent réalisées la même matinée. L'analyse contenue dans ce rapport est strictement construite à partir d'application sur les résultats de certains exercices statistiques (en grande partie des analyses ANOVA). Voici en résumé les conclusions tirées de ce rapport:

- Une pénétration de 6,35 cm est suffisante pour établir la tendance d'augmentation de la résistance en fonction du temps.
- Le gradient de curage supposé a été décelé pour le matériau stabilisé à l'émulsion à 92,5% de confiance. Cependant la friction présente entre la tige et le matériau nuit à la précision des résultats.
- Le nombre d'essais pour un temps donné ou répétition (3 et quelques fois 2 dans notre cas) est insuffisant pour obtenir une valeur moyenne fiable. Il a été déterminé qu'au moins 6 répétitions de l'essai pour un même temps de curage seraient nécessaires à l'obtention d'une valeur moyenne entachée d'une erreur potentielle de 20% et ce pour 80% de confiance. Le nombre de répétitions nécessaires augmente en fonction de la résistance du matériau.
- Des courbes de type " ax^b " et linéaires sont utilisées pour estimer mathématiquement (graphiquement) les résultats de l'essai en fonction du temps de cure selon le liant et la durée de l'étude.

Il est donc possible de conclure que l'essai pénétromètre dans sa forme actuelle possède déjà un potentiel de caractérisation suffisant. Cependant, les résultats d'analyse obtenus ne permettent pas de conclure encore sur la méthode à employer pour déterminer le temps de recouvrement idéal des matériaux recyclés stabilisés.

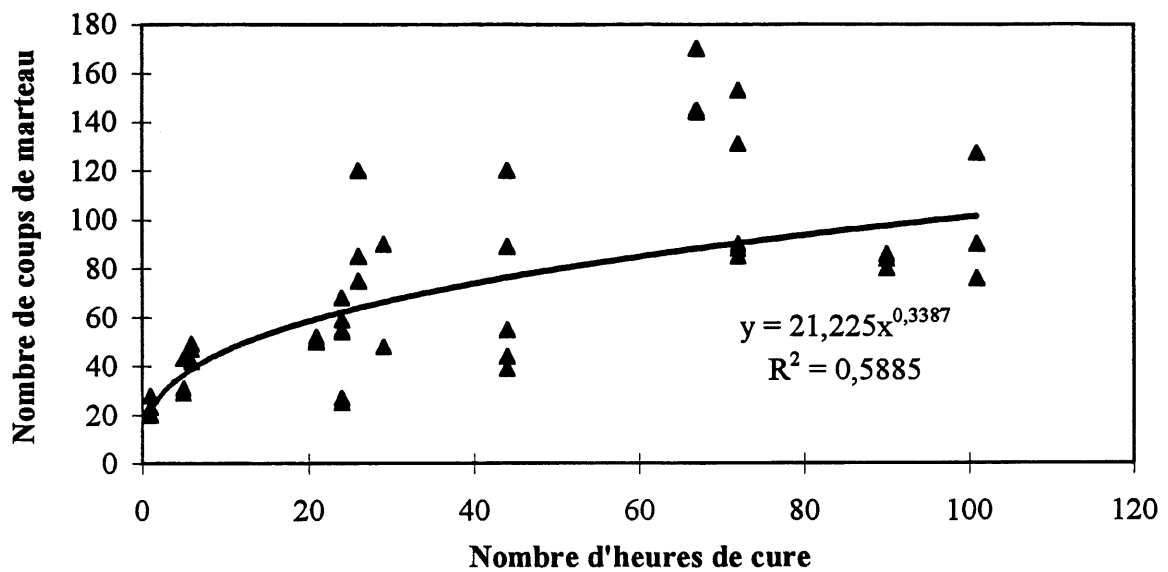
9.1.7 Présentation et analyse de certains résultats typiques

Les graphiques 9.1 et 9.2 présentent les résultats obtenus sur le chantier de réfection du boulevard Lemire, alors que les graphiques 9.3 à 9.9 illustrent les résultats issus des campagnes d'essais 1995 et 1996 sur les planches d'essais. Le graphique 9.4 est issu des résultats obtenus sur le même type de matériau (granulat et liant identique) que la planche d'essais à l'émulsion, mais sur un chantier de réfection (rue Cochrane). Les conditions de cure étaient cependant différentes entre les graphiques 9.3 et 9.4.

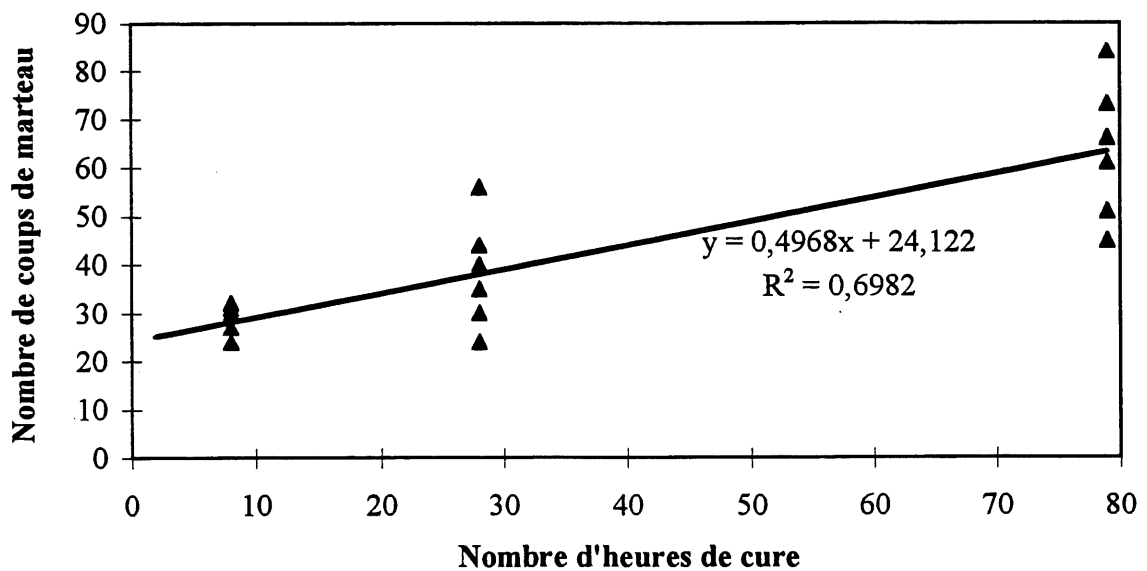
Comme il est possible de le juger en regardant l'ensemble de ces graphiques, la variation dans les résultats au pénétromètre est relativement élevée. Néanmoins, les résultats d'essais Dynaflect et/ou FWD affichent des variations semblables. Cette variation importante peut s'expliquer assez facilement par le fait que les conditions d'essais, à l'échelle du pénétromètre (la tige a un diamètre d'environ 2,5 cm), ne peuvent être véritablement identiques.

En effet, deux essais réalisés au même temps dans le même type de matériau, mais à quelques mètres (voir centimètres) de distance n'ont probablement pas, à l'échelle du diamètre de la tige, des conditions identiques de pénétration (au niveau de la granulométrie par exemple). D'autres part, il n'y a pas de correction établie pour les différences de température entre les groupes de résultats. On remarque également que la variation dans les résultats relatifs à la stabilisation au Stabicol (graphique 9.1) est plus élevée que les autres. Ceci est directement relié aux conditions qui prévalaient sur le chantier. En effet, il existe une plus grande hétérogénéité dans un matériau stabilisé en place qu'en centrale. De plus, le curage a été différent entre chaque groupe d'essais, car l'étape de stabilisation s'est déroulée sur plusieurs jours et les résultats à l'essai du pénétromètre proviennent de différents endroits sur le chantier. Néanmoins une grande variation dans les résultats d'un essai peut être compensée par des essais plus nombreux afin d'obtenir une moyenne fiable. Finalement, soulignons que les coefficients de variation (variance divisée par la moyenne) augmentent en fonction de l'avancement de la cure. Cette dernière observation indique que pour conserver un même niveau de confiance sur la moyenne, il faut réaliser un nombre d'essais toujours plus important au fur et à mesure que la résistance à la pénétration augmente.

Graphique 9.1 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, Stabicol Drummondville

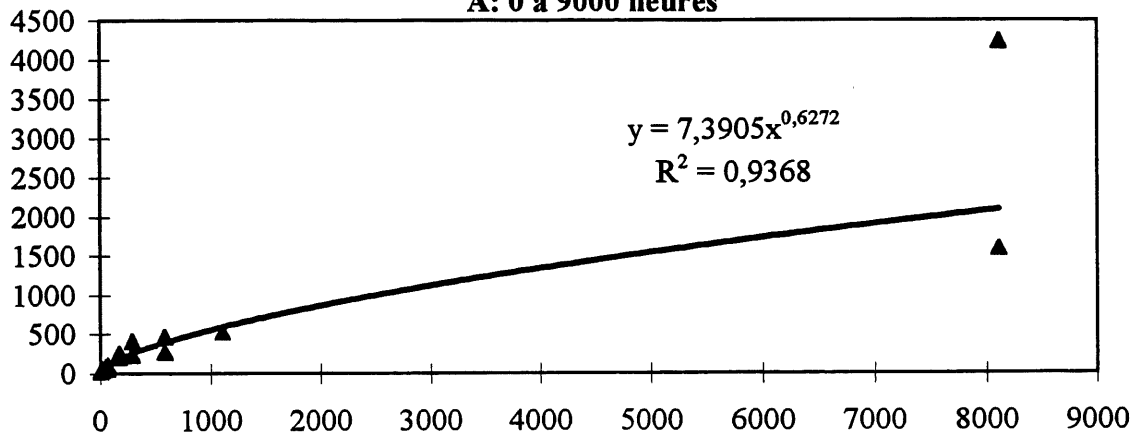


Graphique 9.2 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, CSS-1 Drummondville

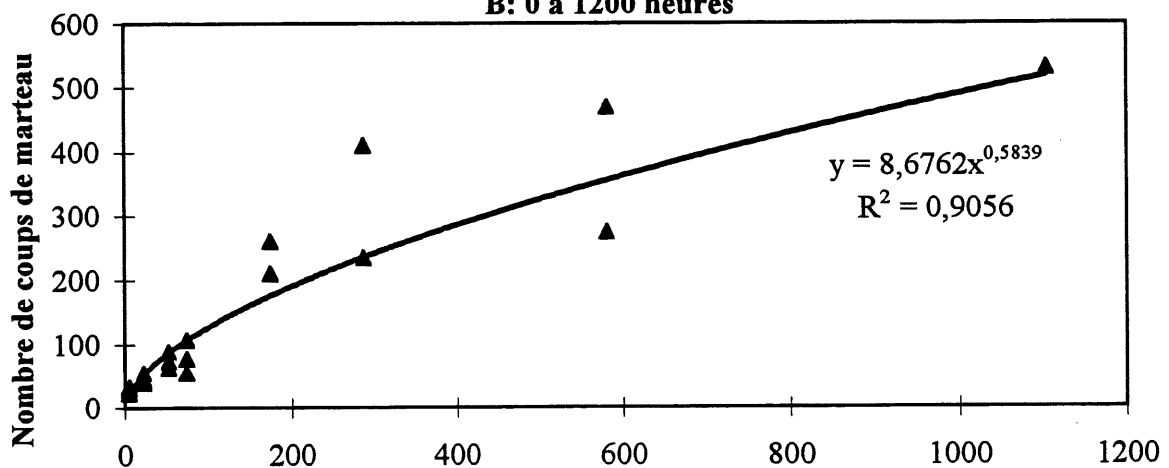


**Graphique 9.3 Résultats à l'essai au pénétromètre pour
6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995, émulsion**

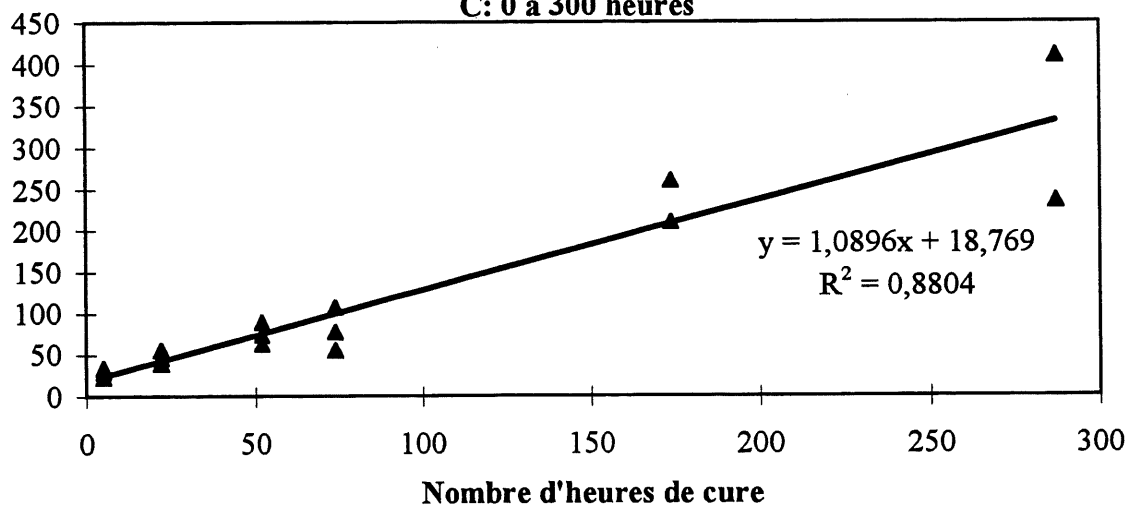
A: 0 à 9000 heures



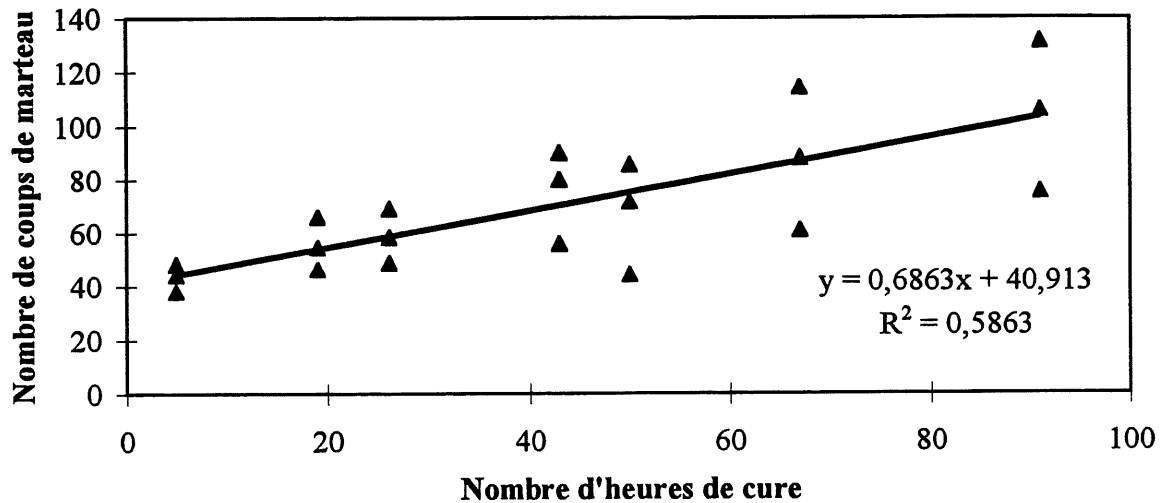
B: 0 à 1200 heures



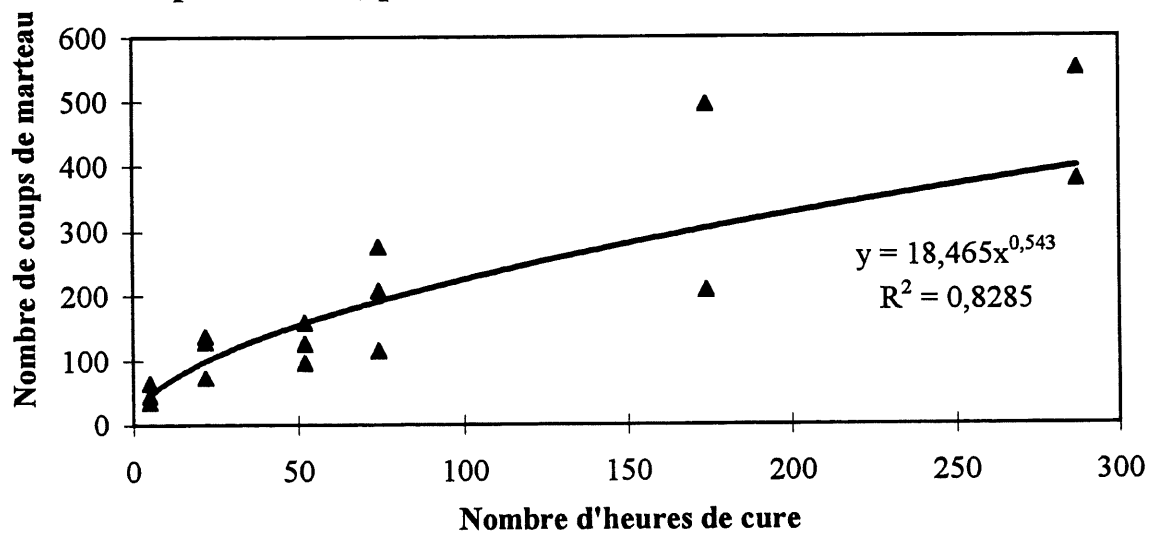
C: 0 à 300 heures



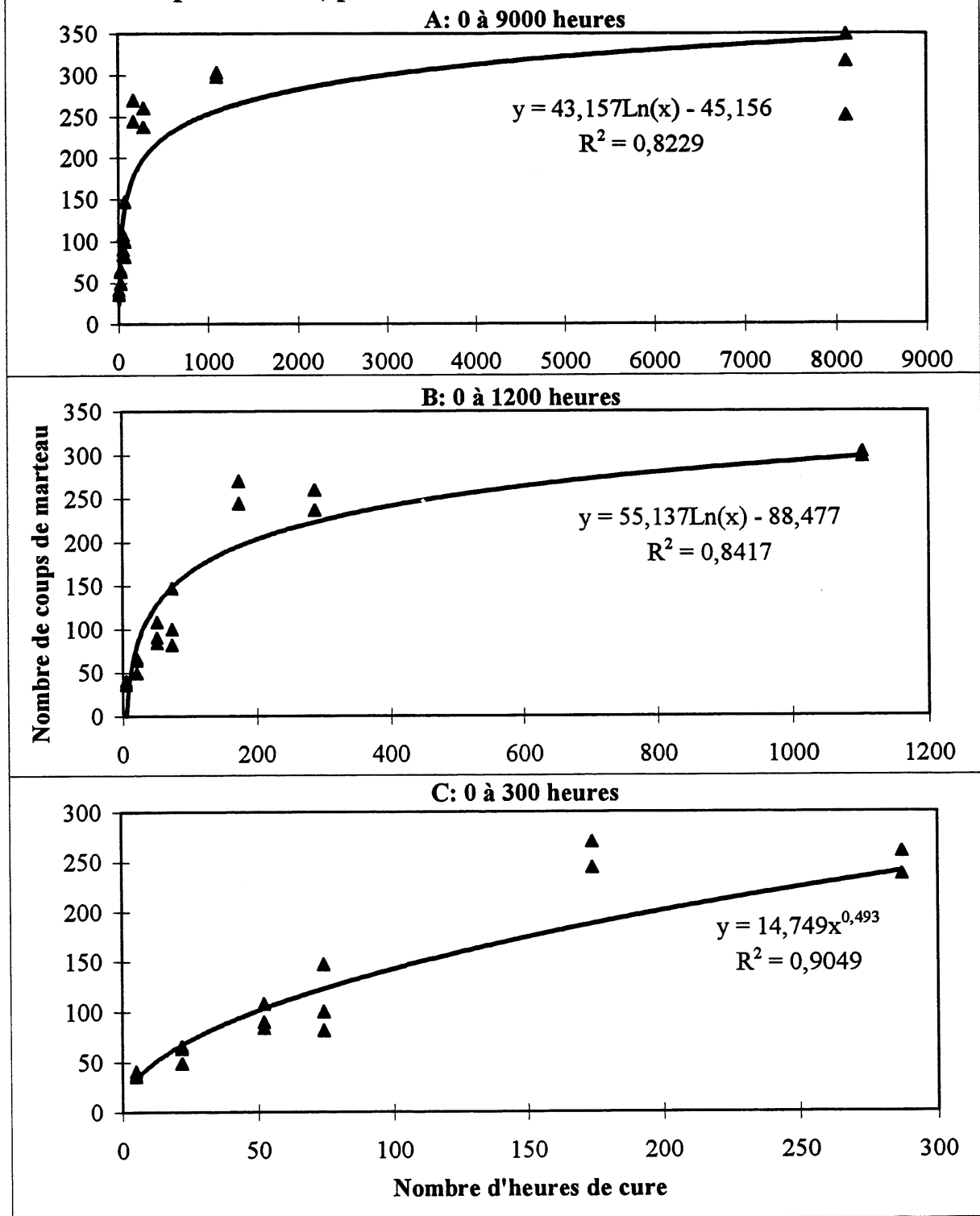
Graphique 9.4 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, rue Cochrane, émulsion

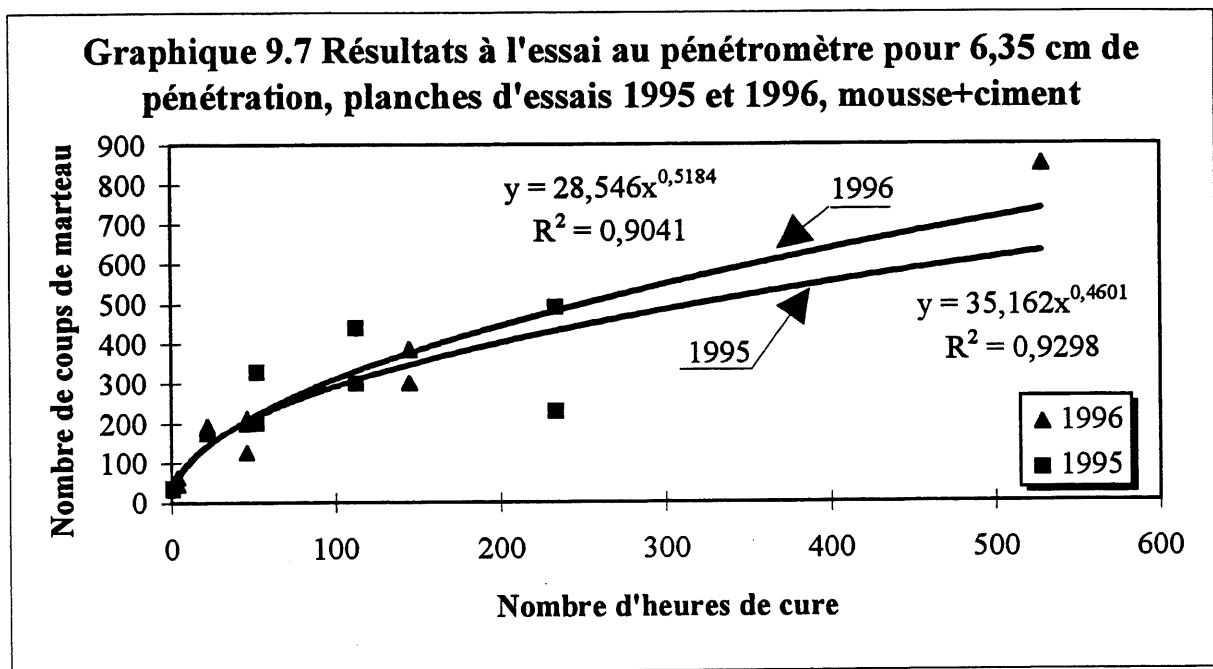


Graphique 9.5 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995, émulsion+ciment



Graphique 9.6 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planche d'essais 1995 émulsion+chaux





Stabicol versus CSS-1 à Drummondville

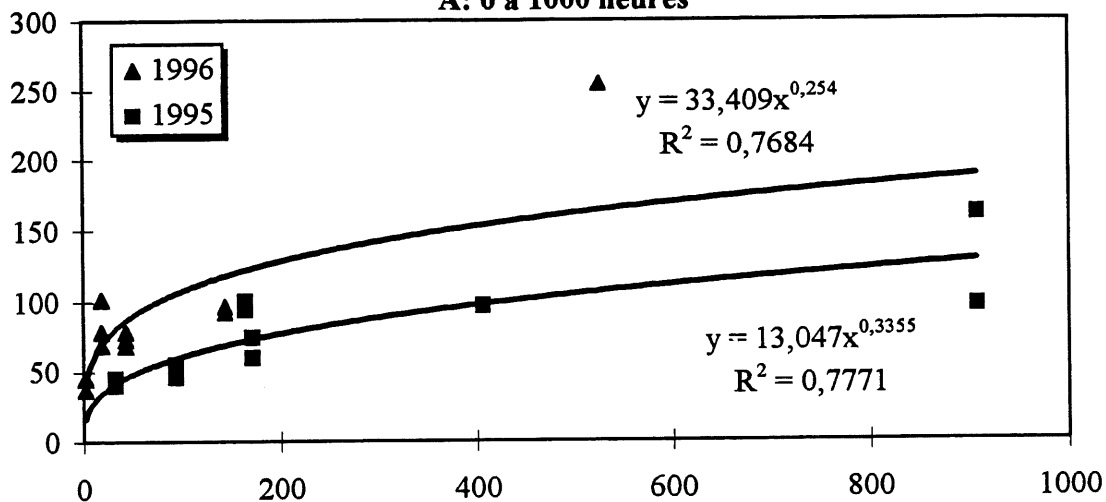
Il est bon de souligner que la courbe de curage présentée pour le Stabicol sous-estime probablement quelque peu les conditions optimales visées. En effet, il est pratiquement impossible (avec les appareils actuels) de distribuer de façon égale le liant avec une stabilisation en place en zone urbaine. Par conséquent, les chances d'effectuer un essai au pénétromètre sur une section de matériau n'ayant que très peu de liant sont assez élevées. Deux résultats très faibles (< 35) ont cependant été éliminés pour des temps de curage supérieur à 60 heures pour diminuer l'influence de ce genre de situation.

On remarque que les deux résultats initiaux (1 heure de cure) sont quasi-identiques (21,2 et 24,5 coups de marteau). On remarque également que le matériau stabilisé au Stabicol est lissé par une équation de type puissance, alors que celui stabilisé au CSS-1 est mieux représenté par une régression linéaire. Selon les équations de lissage obtenues, le matériau stabilisé au Stabicol gagne en 24 heures 41 coups de marteau. Il faut 83 heures au matériau stabilisé au CSS-1 pour parvenir au même gain. Notons que la comparaison n'est pas très rigoureuse, car les conditions de curage

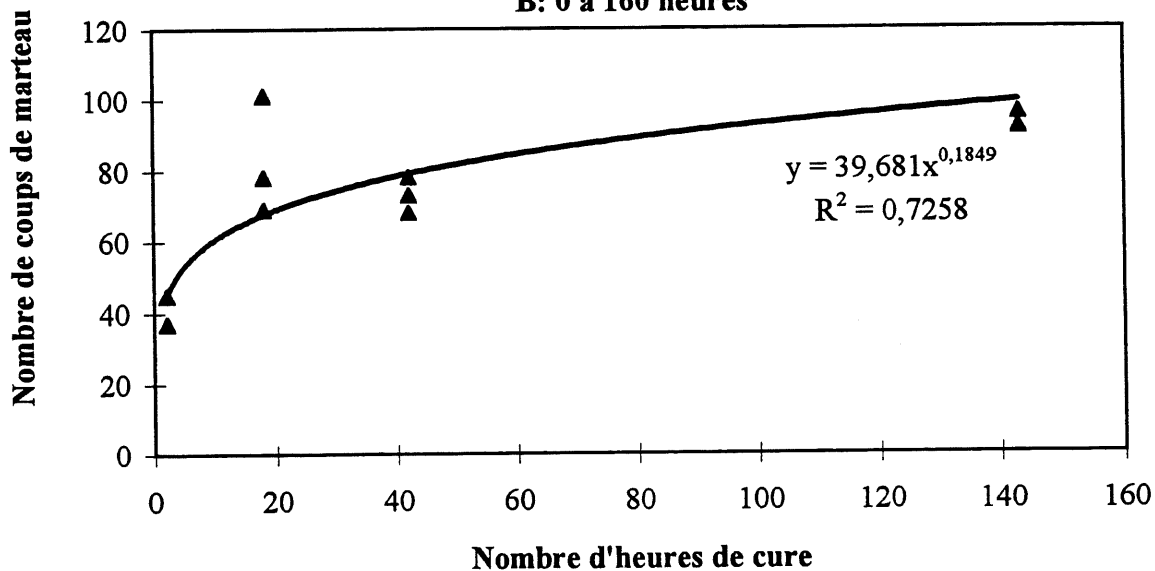
n'étaient pas les mêmes. Il ne faudrait pas conclure que s'il est possible de paver le matériau au Stabicol après 24 heures, on peut alors recouvrir celui stabilisé au CSS-1 après 83 heures. En effet, le recouvrement par le pavage ne nuit pas autant au curage d'un matériau stabilisé par un liant mixte que pour un matériau stabilisé par une émulsion de bitume.

Graphique 9.8 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planches d'essais 1995 et 1996, mousse

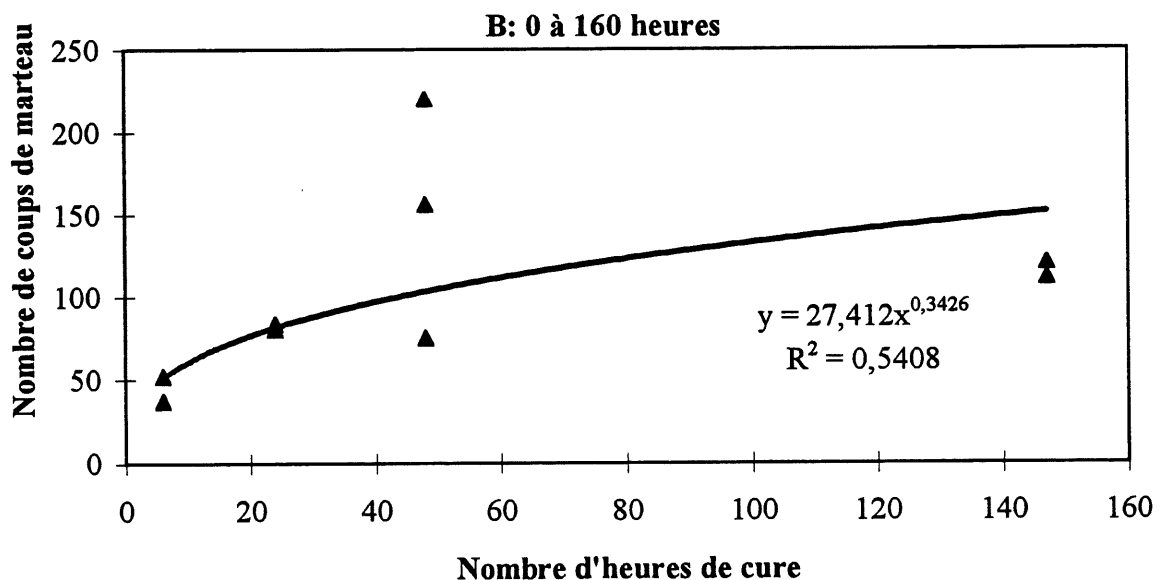
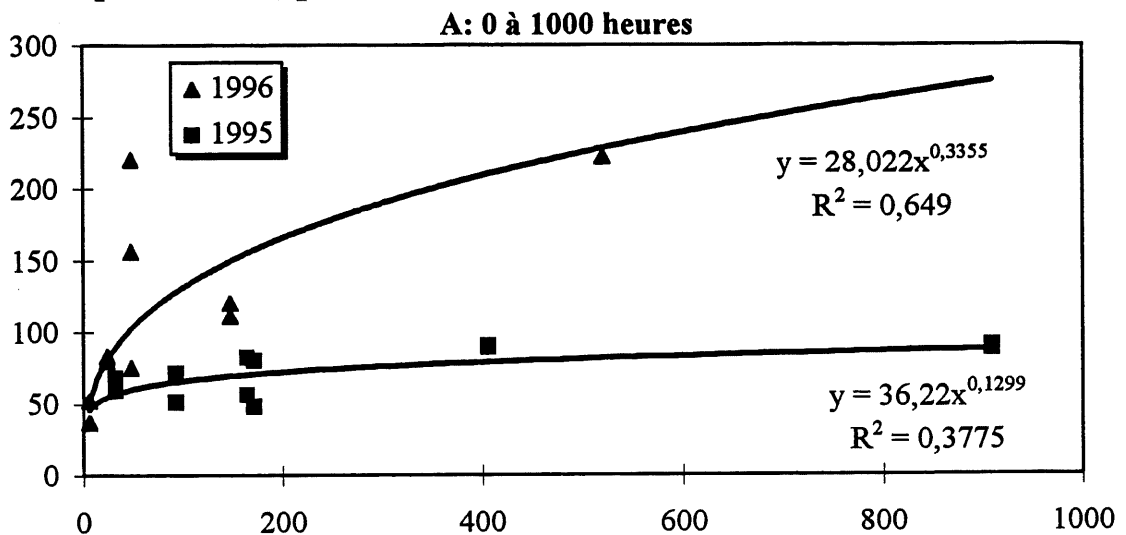
A: 0 à 1000 heures



B: 0 à 160 heures



Graphique 9.9 Résultats à l'essai du pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration, planches d'essais 1995 et 1996, mousse+chaux



Émulsion, émulsion+ciment et émulsion +chaux

Il est bon de rappeler au lecteur que les conditions de cure ont été identiques pour les trois planches stabilisées à l'aide d'émulsion (+ des ajouts). Les résultats initiaux sont très similaires, mais les comportements de cure en fonction du temps sont très différents. À jeune âge, le matériau stabilisé à l'émulsion seulement (planche et chantier de la rue Cochrane) suit davantage

un comportement linéaire, par la suite il est préférable d'utiliser une courbe de type puissance. Le matériau stabilisé à l'émulsion+ciment suit immédiatement un comportement de type puissance. Les valeurs à long terme tendent vers l'infini; l'outil était devenu complètement inefficace. Le matériau stabilisé à la chaux suit également à jeune âge un comportement de type puissance, mais à partir de 175 heures sa résistance ne semble plus augmenter tellement. C'est pourquoi, à moyen et à long terme, des courbes logarithmiques ont dû être employées pour estimer, tant bien que mal, ces comportements.

En 24 heures, le matériau stabilisé à l'émulsion+ciment gagne 85 coups de marteau. Pour atteindre ce gain, le matériau stabilisé à l'émulsion sur la planche a besoin de 78 heures; sur le chantier de la rue Cochrane, pour le même matériau (conditions de cure et opérateur différents) c'est plutôt 125 heures. Le matériau stabilisé à l'émulsion+chaux demande 48 heures de cure pour obtenir le même gain.

Mousse, mousse+ciment, mousse+chaux

Les graphiques 9.7 à 9.9 présentent les comparaisons entre les planches construites en 1995 et celles de 1996. Naturellement, les conditions de cure n'ont pas été les mêmes. On remarque que les planches de 1995 sont toujours moins performantes que celles construites en 1996, même celles stabilisées avec la mousse+ciment où il y avait deux fois plus de ciment dans la planche de 1995 que dans celle de 1996. Les résultats à très long terme pour les planches 1995 ne sont pas indiqués sur ces graphiques, mais nous pouvons souligner qu'il n'y avait pas d'augmentation de résistance pour les planches mousse et mousse+chaux après un an, alors que la résistance de la planche mousse+ciment tendait vers l'infini.

Moins d'essais ont été réalisés sur ces planches que sur les autres, les courbes sont donc moins précises. On peut cependant remarquer que les résultats initiaux sont similaires entre eux (mousse 1995 très différent cependant), mais qu'ils sont différents de ceux observés avec les planches stabilisées avec de l'émulsion. Cette différence est probablement reliée à la variation de granulat utilisé. Il est possible de remarquer que la résistance à la pénétration obtenue avec la planche mousse+ciment est la plus élevée de toutes les planches, ce qui est en accord avec les résultats des autres essais de caractérisation présentés au chapitre 8.

En 24 heures la planche 1996 mousse+ciment gagne 120 coups de marteau, il faut 400 heures de cure à la planche 1996 mousse pour atteindre ce gain, alors que la planche 1996 mousse+chaux demande 142 heures pour obtenir cette performance.

Mousse versus émulsion

Il est intéressant de comparer les résultats obtenus sur les matériaux stabilisés à l'aide de mousse de bitume (et des ajouts) et ceux stabilisés avec l'émulsion (et des ajouts), car ces produits sont directement en compétition sur le marché. Naturellement, les conditions de cure ne sont pas les mêmes, mais l'exercice demeure tout de même intéressant.

On remarque que le matériau stabilisé à la mousse cure un peu plus rapidement que celui stabilisé à l'émulsion, en revanche ce dernier permet une augmentation totale plus importante. En effet, la mousse (1996) gagne en 24 heures (équation court terme) 32 coups de marteau, alors que le matériau stabilisé à l'émulsion obtient un gain de 26 coups. Très vite cependant le matériau stabilisé à l'émulsion permet d'obtenir des augmentations de résistance à la pénétration plus importantes. Après 48 heures, le matériau stabilisé à la mousse obtient un gain de 42 coups, alors que le matériau stabilisé à l'émulsion présente une augmentation de 52 coups. Après 168 heures (1 semaine), on remarque que le matériau stabilisé à l'émulsion obtient un gain de 183 coups de marteau pour une augmentation de seulement 63 coups pour le matériau stabilisé à la mousse. On remarque que la cure semble se terminer à ce moment là pour la mousse, alors que la cure pour l'émulsion se poursuit pendant plus de 1000 heures (en fonction du pénétromètre).

L'ajout de ciment à la mousse de bitume permet à la fois d'augmenter le taux de curage et la durée de la cure de ce matériau. Après 168 heures de cure, la mousse+ciment (1996) présente un gain de 380 coups de marteau, alors que l'émulsion+ciment obtient pour la même durée de cure 280 coups de marteau supplémentaires. Les deux matériaux ont dépassé la limite d'utilisation de l'outil à long terme.

Avec un ajout de chaux, les deux matériaux améliorent leur taux de curage à court terme. À long terme cependant, l'ajout de chaux ne permet pas de gain important de la résistance à la

pénétration, on note même une diminution de cette résistance pour le matériau stabilisé à l'émulsion.

9.1.8 Module de portance et résultats au pénétromètre

De façon générale, les résultats de résistance à la pénétration suivent les mêmes tendances que les modules de portance présentés au chapitre 8, c.-à-d. que les matériaux développant les modules les plus élevés obtiennent les résistances à la pénétration les plus importantes. Le tableau 9.1 permet de comparer les résultats de la résistance à la pénétration à 200 heures de cure (établie avec les équations présentées sur les graphiques 9.1 à 9.9) et les modules d'élasticité statiques et dynamiques obtenus à l'essai de plaque et au FWD. On note naturellement certaines incohérences, mais il faut tenir compte que le nombre d'essais est relativement limité. De plus, les résultats à l'essai du pénétromètre sur le Stabicol démontraient une variation trop importante (coefficient R^2 très bas) pour être jugés valables. Il faut aussi préciser que les différents matériaux stabilisés avec de la mousse de bitume n'ont qu'un mois de cure, alors que les autres ont environ 1 an (et ont donc subi un hiver). On remarque dans l'ensemble une excellente concordance entre les résultats de ces trois essais. Ainsi on observe des ratios approximatifs de 0,12 et 0,4 de la résistance à la pénétration (6,35 cm et 200 heures de cure) sur les modules élastiques obtenus à l'aide du FWD et de l'essai de plaque.

Il est évident que ces ratios sont valables seulement pour les conditions présentées, c.-à-d. pour une résistance à la pénétration après 200 heures de cure et des modules élastiques obtenus à long terme. Cependant, il serait possible d'établir des corrélations entre ces paramètres pour des temps de cure identiques. Pour ce faire, il faudrait établir (sur un même terrain), en fonction du temps, le module du matériau (à l'aide d'un appareil FWD par exemple) et la résistance à la pénétration de celui-ci (ou du gain de résistance à la pénétration en terme de l'augmentation du nombre de coups net). À partir de résultats sur différents matériaux stabilisés avec le même liant, il serait possible de juger de la précision d'une corrélation établie. Néanmoins, cette démarche demanderait des moyens très importants et le succès de l'entreprise n'est pas assuré.

**Tableau 9.1 Résistances à la pénétration et modules d'élasticité
pour différents matériaux recyclés stabilisés**

	Pénétromètre 200 heures de cure	FWD 1996		Essai de plaque 1996		Ratio Pénétromètre/ FWD	Ratio Pénétromètre/ Essai de plaque
		T°C	(MPa)	T°C	(MPa)		
Planches d'essais							
Émulsion	237	12	1799	25	531	0,13	0,45
Émulsion+cimen	328	12	2454	26	847	0,13	0,39
Émulsion+chaux	201	12	1868	25	549	0,11	0,37
Mousse	106	12	1194	17	336	0,09	0,32
Mousse+ciment	445	12	3866	14	2090	0,12	0,21
Mousse+chaux	168	12	1680	17	375	0,10	0,45
Drummondville							
CSS-1	123	15	1105			0,11	
Stabicol	127	15	2125			0,06	

9.1.9 Discussion et recommandations

L'outil dans sa forme actuelle peut déjà être très utile dans le contrôle en chantier des matériaux recyclés stabilisés. En premier lieu, l'essai au pénétromètre peut être utilisé pour estimer le niveau d'homogénéité de la stabilisation. En effet, les zones dont l'augmentation de résistance à la pénétration moyenne en fonction du temps est nulle ou très faible sont probablement des endroits où il y a peu ou pas de liant. Ainsi, cet essai peut nous indiquer par exemple si la stabilisation près des trottoirs (ou tout autres obstacles urbains) est adéquate ou médiocre.

En second lieu, il serait possible d'utiliser cet essai pour déterminer le temps opportun pour la mise en place du revêtement. Il est difficile de présenter pour l'instant un gain en coups de marteau nécessaire précis, mais il semble qu'une augmentation de 200 coups pour un matériau stabilisé à l'émulsion est suffisant. Avec ce nombre, il faudrait attendre environ 8 jours avant de paver la planche d'essais stabilisée à l'émulsion. Le même matériau sur la rue Cochrane aurait nécessité 12 jours de cure, alors que le matériau stabilisé au CSS-1 à Drummondville aurait demandé jusqu'à 16 jours. Néanmoins, il serait possible d'établir des gains de résistance différents pour les matériaux stabilisés en centrale et ceux stabilisés en place. En effet, la stabilisation en place étant moins bien contrôlée (homogénéité et taux d'épandage moyen du liant), l'augmentation moyenne de résistance à la pénétration est de toute évidence moins élevée (pour des conditions de cure identiques), car la résistance finale moyenne est généralement moindre. Par exemple, on pourrait utiliser pour une stabilisation en place un gain de 150 coups de marteau, ainsi le matériau stabilisé au CSS-1 à Drummondville aurait nécessité environ 12 à 13 jours de cure. Néanmoins ces gains de coups de marteau proposés demandent à être vérifiés avec d'autres matériaux avant d'être adoptés.

Malgré ces résultats très encourageants, l'outil et la procédure d'essai méritent des améliorations:

- Un nombre de répétitions (pour un temps et un lieu donné) minimum de six essais devrait être utilisé pour calculer une moyenne de résistance. Ce nombre doit être augmenté en fonction de l'augmentation du coefficient de variation dans les résultats.
- Du point de vue productivité et sécurité, l'appareil doit être mécanisé.

- Il serait intéressant de tester différents poids de marteau, car l'outil actuel est limité. On juge qu'un essai dépassant 300 ou 400 coups pour 6,35 cm de pénétration dépasse la limite d'efficacité de l'outil.
- Sans être un essai très destructif, un trou demeure dans le matériau après l'essai. Avec le nombre important de répétitions que nécessite le calcul fiable d'une moyenne, une procédure de remplissage des trous doit être envisagée.
- Le diamètre de la tige de l'outil devrait être diminué de façon à être inférieur au diamètre maximum de la pointe, ceci afin d'annuler la friction qui se développe entre la tige et le matériau testé.

Nous pouvons conclure ce chapitre en disant que si la procédure et l'outil utilisés ne sont pas parfaits à l'heure actuelle, l'expérience acquise avec ces derniers a démontré le potentiel d'un essai de pénétration dans le contrôle en chantier des matériaux recyclés stabilisés. Par conséquent, nous invitons les intervenants tels le MTQ et les municipalités importantes de la province, à investiguer ce type d'essais de caractérisation et de produire le plus rapidement possible une procédure d'essai de pénétration dans le contrôle des matériaux recyclés stabilisés en chantier.

Section 4

Éléments de synthèse

Relations entre les différentes études

Conclusion

Cette dernière section présente une synthèse des éléments présentés dans les chapitres précédents. Par la même occasion, certaines relations entre les différents résultats obtenus seront mises en évidence. Cette section est composée d'un seul chapitre:

Chapitre 10. Éléments de synthèse et conclusion

Chapitre 10. Éléments de synthèse et conclusion

10.0 Éléments de synthèse

10.0.1 Introduction

Les matériaux recyclés stabilisés sont des mélanges granulats-liants relativement complexes et mal connus. Néanmoins, les essais disponibles pour leur caractérisation et leur contrôle sont de plus en plus nombreux et efficaces. Il est donc possible aujourd'hui d'étudier cette classe de matériaux sur des bases adéquates qui possèdent un certain nombre de références crédibles. Par le fait même, les facteurs qui influencent la cure, la qualité et la durabilité de ces matériaux sont de mieux en mieux identifiés et étudiés. Ainsi, la cure des matériaux stabilisés est influencée principalement par le temps et l'évaporation (l'importance relative de ces facteurs est fonction du type de liant utilisé). D'autre part, les principaux paramètres à considérer concernant la qualité des matériaux et leur mise en place sont: l'atteinte des teneurs en eau et en liant optimales, une compaction adéquate et une cure suffisante avant le recouvrement par le revêtement. Finalement, les cycles de gel-dégel et la saturation de ces matériaux diminuent leurs résistances mécaniques, leurs modules d'élasticité et, de toute évidence, leur durabilité (encore une fois, l'importance relative de ces facteurs est fonction du type de liant utilisé).

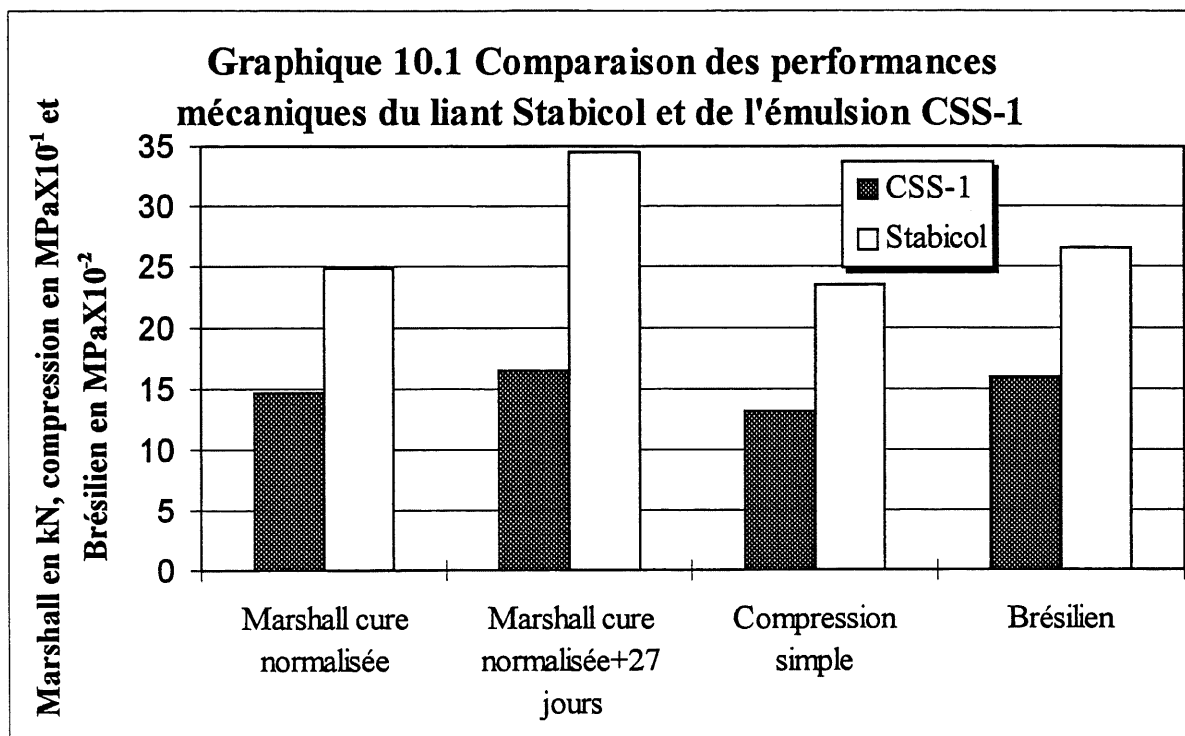
La température influence grandement les modules élastiques de ces matériaux. En général, plus le pourcentage de bitume dans le matériau est important, plus l'élévation de la température diminuera son module d'élasticité. Il est encore difficile d'évaluer de façon analytique la réelle influence de ce facteur. Il existe cependant certaines études [KALLAS F., 1979] [GOACOLOU et coll, 1996] [GODARD, 1991] qui permettent une approximation grossière des corrections de modules à appliquer sur ces types de matériaux. Ces corrections ont été utilisées dans le chapitre 8 sur des résultats obtenus au FWD et à l'essai de plaque. Le fruit de cet exercice a semblé, à première vue, donner des valeurs cohérentes et l'application de ces corrections nous a semblé préférable à l'utilisation des résultats bruts.

Les matériaux recyclés stabilisés sont souvent classés selon le type de liant utilisé dans leur fabrication. Cette méthode de classement est très pratique et logique, car le liant utilisé est

probablement le facteur qui influence le plus les propriétés mécaniques et les comportements de ces matériaux. Les études présentées dans ce mémoire démontrent de façon généralisée cette affirmation.

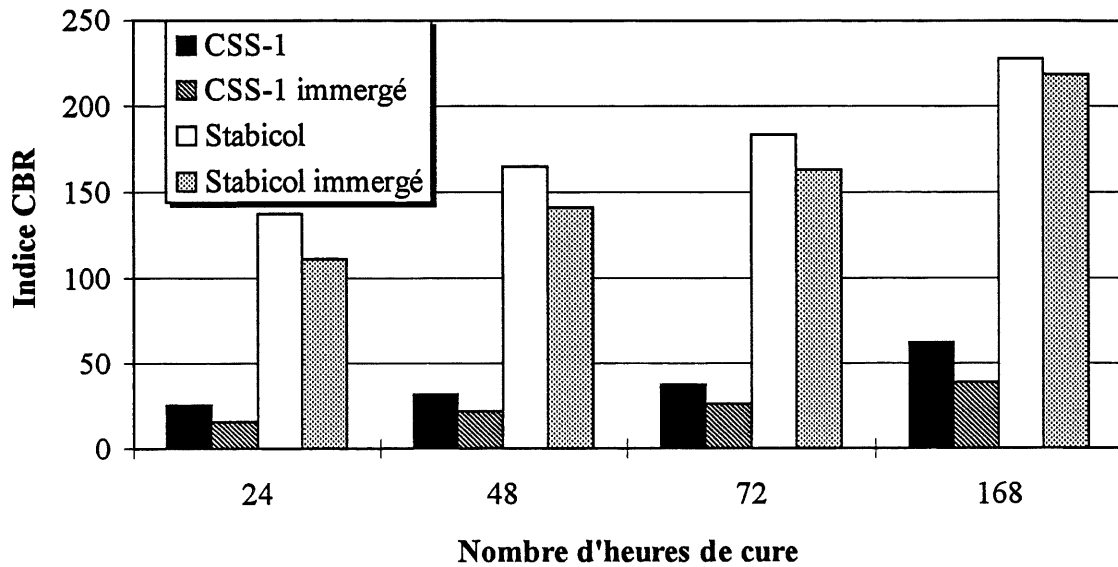
10.0.2 Synthèse des résultats

Lors des études en laboratoire avec les matériaux stabilisés au CSS-1 et au Stabicol, plusieurs relations mathématiques ont été établies afin de décrire les résistances mécaniques de ces matériaux en fonction du pourcentage de compaction. En se servant de ces équations, pour 100% de compaction, il est facile de présenter un histogramme comparatif des deux matériaux en fonction des divers essais de caractérisation effectués. Le graphique 10.1 présente la comparaison des essais Marshall cure normalisée, Marshall cure normalisée +27 jours, compression simple et Brésilien. Il faut porter une attention à l'échelle des "y" qui est variable selon le type d'essai (compression $\div 10$ et Brésilien $\div 100$). On remarque que les résistances mécaniques du matériau stabilisé au Stabicol sont toujours approximativement le double de celles obtenues avec l'émulsion de bitume CSS-1. Après saturation, ce ratio grimpe à environ 2,5.

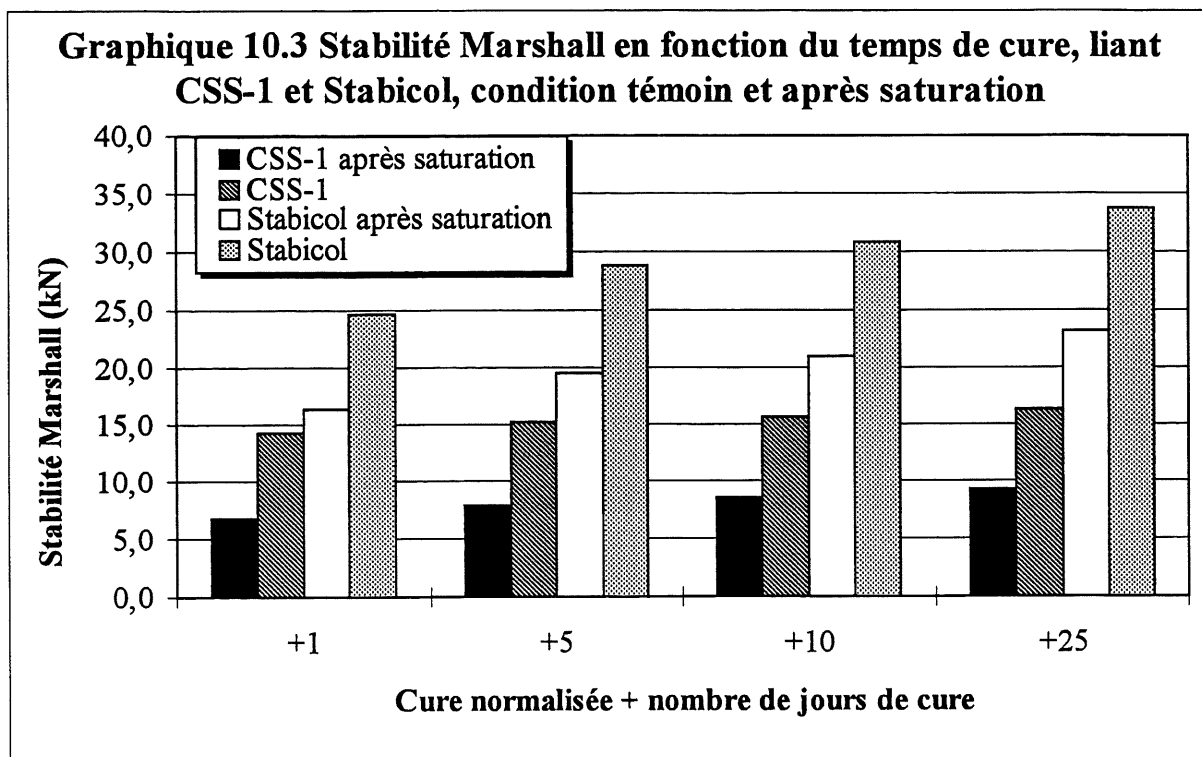


Le graphique 10.2 illustre la valeur de l'indice CBR (calculée avec les équations établies en fonction du temps de cure) pour les deux matériaux étudiés, et ce, pour les conditions sans et avec immersion. Ici, la différence est beaucoup plus marquée. Il faut cependant souligner que la teneur en eau moyenne atteinte avec le matériau stabilisé au CSS-1 après 168 heures de cure était encore près du double de celle obtenue après la cure normalisée Marshall. Les conditions de cure imposées aux échantillons CBR se rapprochent beaucoup plus de la réalité que celles imposées lors des essais Marshall. Il est donc possible de dire que cette étude de curage décrit la première phase de cure (en partie du moins), c.-à-d. la période de cure avant recouvrement, alors que l'étude de curage sur les briquettes Marshall se rapprocherait davantage de la phase de cure post-recouvrement. On ne peut donc pas comparer directement les deux sur un même graphique.

Graphique 10.2 Augmentation de l'indice CBR en fonction du temps, CSS-1 et Stabicol, condition immergée et non immergée



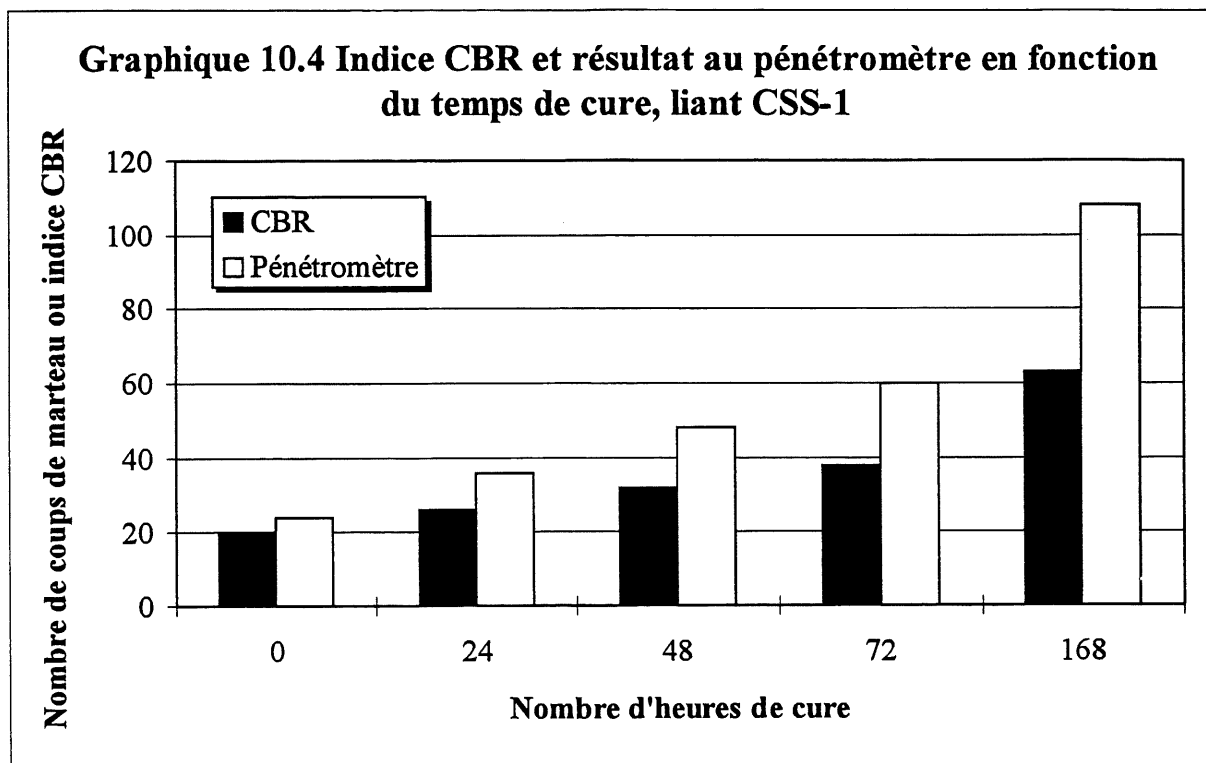
Le graphique 10.3 présente la progression (selon les équations établies) des deux matériaux lors de l'étude de curage avec l'essai Marshall. On remarque que la progression est plus importante avec le liant Stabicol. En conséquence, l'écart de résistance mécanique continue d'augmenter entre les deux liants pendant au moins 1 mois.



Les deux graphiques précédents étudient le curage des matériaux recyclés stabilisés dans un environnement de laboratoire. L'essai au pénétromètre a été effectué sur ces mêmes matériaux lors de la réfection du boulevard Lemire. Malheureusement, les essais réalisés avec cet outil sur le matériau stabilisé au Stabicol ont été jugés erronés. Toutefois, ceux effectués sur le matériau stabilisé au CSS-1 ont donné des résultats cohérents. Le graphique 10.4 compare la progression de la résistance à la pénétration et de l'indice CBR (en fonction des équations établies) pour le matériau stabilisé au CSS-1. On remarque que la progression de la résistance à la pénétration augmente plus rapidement que celle observée avec l'essai CBR. Néanmoins, il est difficile d'expliquer ou d'analyser cette différence, car les conditions de cure n'étaient évidemment pas les mêmes.

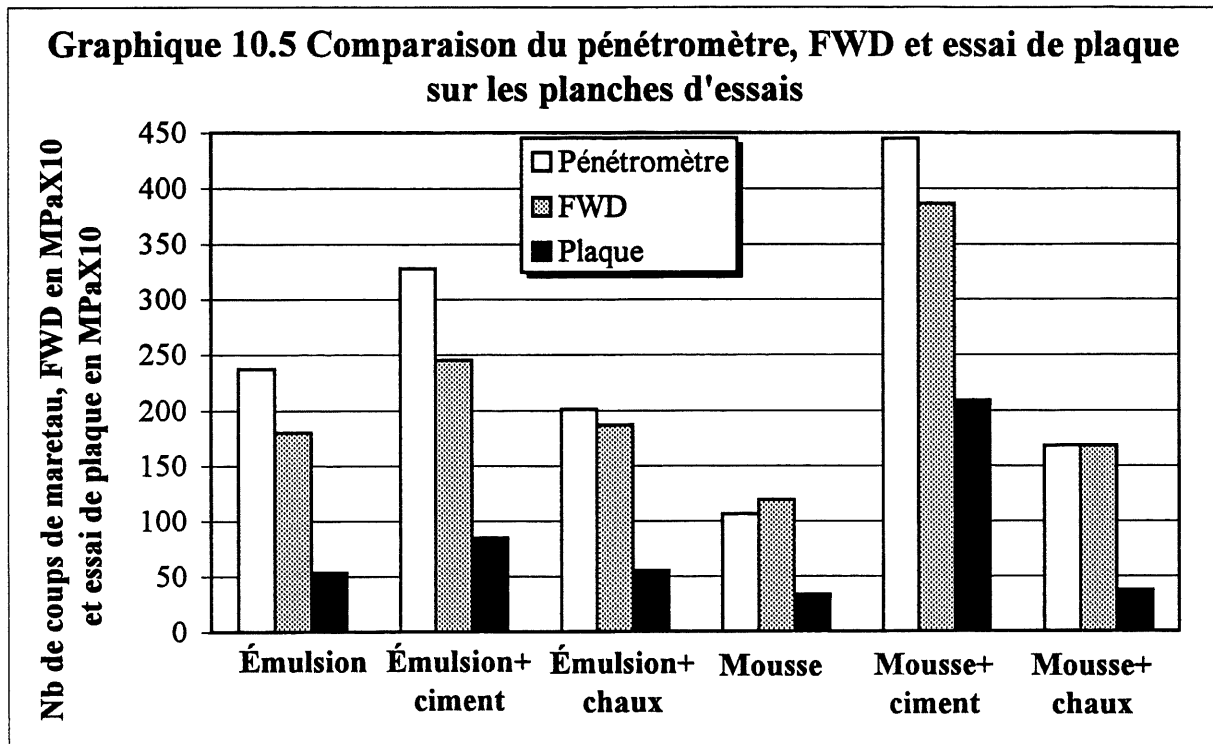
Le pénétromètre a été utilisé intensivement sur les planches d'essais. Au chapitre 9, à la section 9.1.8, les résultats du pénétromètre à 200 heures de cure ont été comparés aux valeurs de modules d'élasticité obtenues avec le FWD et l'essai de plaque. La majorité des ratios

(pénétrömètre/FWD) et (pénétrömètre/essai de plaque) sont semblables, soit environ 0,12 et 0,4 respectivement.



Le graphique 10.5 illustre les résultats présentés à la section 9.1.8. En observant ce graphique, et même en tenant compte du nombre limité d'essais effectués, il est possible de remarquer certaines tendances. Ainsi, les trois types d'essais pour les matériaux stabilisés à l'émulsion donnent des résultats très comparables en terme de proportion (ratio essai "x"/essai "y"). On note cependant que le FWD indique un résultat un peu plus élevé pour le matériau Émulsion+chaux que les autres essais, et que l'essai de plaque présente un résultat un peu faible pour le matériau Émulsion. Avec les matériaux stabilisés à la mousse de bitume, le scénario est relativement différent. En effet, les proportions sont très variables et on note plusieurs divergences les concernant. Cependant, il faut noter que le nombre d'essais au pénétrömètre était beaucoup plus restreint avec ces matériaux et que ceux-ci avaient bénéficié d'un seul mois de cure (et n'avaient pas subi un hiver non recouverts) avant les essais FWD et de plaque. Finalement, on peut observer que les trois essais classent les

matériaux, à une seule exception près (Émulsion vs Émulsion+chaux avec le pénétromètre), avec le même ordre de portance.



De façon à éviter que l'on fasse des rapprochements directs entre la planche Émulsion+ciment et le matériau stabilisé au Stabicol, il est prudent de souligner qu'il y a une différence importante entre ces deux matériaux. En effet, dans le deuxième cas, on subtilise un certain pourcentage de bitume pour le remplacer par du ciment, alors que dans le premier cas on ajoute une certaine portion de ciment sans diminuer le pourcentage de bitume dans le mélange.

L'étude gel-dégel effectuée (section 6.6), celles observées dans la littérature (section 2.3.5) et certaines observations relevées à partir des résultats concernant les planches d'essais indiquent que les matériaux stabilisés de façon mixte, et particulièrement bitume+ciment, sont plus sensibles que ceux stabilisés à l'aide d'un liant hydrocarboné seulement. Dans un milieu semi-saturé ou saturé, cette sensibilité augmente de façon inquiétante. Des études supplémentaires, visant à préciser cette sensibilité et/ou à améliorer cette classe de matériau face à une condition de gel-dégel seraient très

utiles, sinon nécessaires. En effet, les matériaux stabilisés de façon mixte possèdent plusieurs avantages comparés à ceux stabilisés avec un liant hydrocarboné seul (temps de cure avant recouvrement très court, résistances mécaniques accrues, module de portance supérieur, meilleure tenue à l'eau, etc.), et leur faiblesse à l'égard du phénomène de gel risque d'annuler (dans les conditions environnementales du Québec), à moyen terme, l'ensemble des gains obtenus avec leur utilisation. La sensibilité de ces matériaux concernant la présence de sels de déverglaçage devrait également être étudiée.

Le contrôle en chantier du taux d'épandage du liant mixte demeure un problème, car l'hydratation du ciment influence le résultat de l'essai d'extraction. À très court terme cependant (hydratation nulle ou très faible), aucune influence du ciment sur les résultats de cet essai n'est notée. Le problème pourrait potentiellement être contré en modifiant la norme actuelle en fonction des conditions d'hydratation du ciment.

L'étude de perméabilité a permis de constater que les matériaux recyclés stabilisés possèdent une capacité drainante adéquate.

La section 7.4 du mémoire a présenté une critique portant sur l'utilisation de l'essai BNQ 2300-040 (détermination de la densité brute des bétons bitumineux compactés) avec les matériaux recyclés stabilisés. Un sérieux doute sur l'applicabilité de l'essai BNQ 2300-045 (densité maximale) avec cette classe de matériaux a aussi été émis, mais aucune expérimentation sérieuse n'a été réalisée pour démontrer ce fait. Le MTQ devrait étudier ce problème potentiel le plus vite possible, car ces deux essais sont utilisés dans la formulation des matériaux recyclés stabilisés.

Les planches d'essais construites au CTED de la ville de Montréal ont permis d'obtenir des renseignements très précieux concernant les différents matériaux recyclés stabilisés. Certains relevés effectués par les appareils dynamiques Dynaflect et FWD mériteraient d'être étudiés et analysés de façon plus approfondie, car certaines incohérences ont été notées, mais n'ont pu être expliquées. Ce véritable laboratoire de terrain a aussi permis de mettre en relief les difficultés d'opération et de comparaison des résultats obtenus avec des conditions de chantier (température variable, homogénéité relative des matériaux, conditions de vents variables, etc.).

Le pénétromètre dynamique mérite une attention particulière, car les résultats obtenus démontrent, de façon claire et sans équivoque, le potentiel d'un essai de pénétration dans la caractérisation des matériaux recyclés stabilisés et permet de contrôler efficacement la cure de ceux-ci.

10.1 Généralités et conclusion

Les méthodes de réfection apparentées à la pulvo-stabilisation sont en croissance au Québec. Cette popularité est reliée au fait qu'il est possible, en effectuant ce type de réfection, de redonner un aspect neuf à la chaussée, tout en réalisant une économie par rapport à une technique de reconstruction quasi complète. De plus, les techniques de réfection par pulvo-stabilisation conviennent pour résoudre un nombre très important de problèmes, allant de la simple fissuration excessive du pavage au sous-dimensionnement de la fondation supérieure. En réalité, les seuls problèmes que ces techniques ne peuvent pas véritablement résoudre sont ceux reliés aux couches inférieures de la chaussée, telles l'infrastructure et la sous-fondation (par exemple, un problème de drainage et/ou une sous-fondation gélive). Néanmoins, même lorsque ces problèmes sont rencontrés, la technique de stabilisation des matériaux recyclés peut encore être utile. En effet, il s'agit, dans ces cas, d'excaver la chaussée en conservant les matériaux de surfaces (béton bitumineux, béton de ciment et granulats non contaminés) en piles. Une fois les problèmes corrigés, les matériaux recyclés sont concassés et stabilisés en centrale pour être ensuite remis en place. La mise en place d'une mince couche d'enrobé bitumineux termine le travail.

Les outils que possède l'ingénieur pour caractériser et contrôler la qualité des matériaux recyclés stabilisés sont beaucoup moins puissants que ceux utilisés avec les granulats et/ou les bétons. Ainsi, un certain nombre de réfections par pulvo-stabilisation ne permettent pas d'atteindre les objectifs de durabilité visés. Trop souvent ces "échecs" sont reliés à une mauvaise compréhension et/ou à un mauvais contrôle des matériaux recyclés stabilisés. De plus, les techniques de réfection par pulvo-stabilisation sont actuellement utilisées avec les chaussées faiblement circulées, alors

que l'on voudrait étendre cette méthode aux chaussées à trafic dense. Pour ce faire, de nouvelles approches et de nouveaux liants sont testés, mais, avant d'utiliser ces nouveaux produits avec confiance, un certain nombre d'études en laboratoire et de suivis sur le terrain s'imposent. En définitive, l'augmentation des connaissances dans le domaine des matériaux recyclés stabilisés n'est pas un luxe, mais une réelle nécessité.

Il ne faudrait tout même pas dramatiser la situation. Depuis vingt ans, d'énormes progrès ont été réalisés dans ce domaine. Ainsi, on connaît de nos jours les principaux facteurs qui influencent la qualité des matériaux recyclés stabilisés à court et à moyen termes. L'expérience acquise par les entrepreneurs québécois au cours des dix dernières années garantit un minimum de qualité. De plus, les équipements utilisés sont plus performants et permettent un meilleur contrôle des paramètres tels la granulométrie, l'épaisseur d'intervention et le taux d'épandage du liant que ceux de la génération précédente. Les techniques de contrôle en chantier s'améliorent également, même si elles ne permettent pas toujours d'optimiser véritablement la qualité et la productivité des travaux.

De plus, bon nombre d'institutions ont démontré l'excellent potentiel des matériaux recyclés stabilisés comme fondation de chaussées. À cet égard, la ville de Montréal, qui utilise la technique de pulvo-stabilisation en centrale pour la réfection de certaines rues résidentielles, a réalisé en 1996 l'évaluation de 40 kilomètres de rues réhabilitées à l'aide de cette technique. La performance de ces chaussées a été comparée à celle obtenue avec une construction neuve utilisant de la pierre concassée comme matériau de fondation supérieure. Ainsi, il est possible de constater que les rues réhabilitées avec les matériaux recyclés stabilisés ont développé un taux de fissuration 5 fois moins élevé, après 4 ans d'âge, que les rues construites avec de la pierre concassée.

Les essais de caractérisation des chaussées sur le terrain ont grandement progressé avec l'arrivée sur le marché du Dynaflect, mais surtout du FWD. Néanmoins, il est encore impossible actuellement de se satisfaire de quelques résultats pour évaluer dans son ensemble la portance d'une chaussée. Ainsi, il est toujours préférable d'avoir un nombre important de résultats et l'utilisation de deux types d'essais en parallèle est nettement conseillée. En effet, même si le FWD est considéré comme l'outil de caractérisation le plus performant existant à l'heure actuelle, il est

est considéré comme l'outil de caractérisation le plus performant existant à l'heure actuelle, il est quasi impossible de vérifier son résultat sans effectuer d'autres types d'essais en parallèle. Rappelons l'incohérence notée entre les résultats du FWD 1995 et ceux de 1996 pour les planches d'essais. De plus, il est encore difficile d'interpréter ces résultats en terme de nombres structuraux de façon simple.

Des études relativement poussées menées en France et aux États-Unis permettent d'évaluer approximativement l'influence de la température sur les matériaux stabilisés. D'ailleurs, bon nombre d'essais de laboratoire, qui ne sont pas véritablement connus au Québec, sont utilisés avec succès, semble-t-il, dans ces pays avec les matériaux stabilisés (en France notamment). Ici, la majorité des essais utilisés dans la caractérisation et le contrôle en laboratoire des matériaux recyclés stabilisés est empruntée aux domaines des granulats et des bétons. Cette façon de faire comporte plusieurs avantages, mais il en résulte quelques fois des utilisations discutables comme nous l'avons démontré à la section 7.4 (critique sur l'application de l'essai BNQ 2300-040 avec les matériaux recyclés stabilisés pour déterminer leurs densités brutes).

En conséquence, et à l'égard des projets d'encadrement de ce projet de maîtrise, l'objectif visé était l'augmentation des connaissances dans les domaines de la caractérisation et du contrôle de qualité des matériaux recyclés stabilisés. Par l'entremise d'études en laboratoire et sur le terrain, nous croyons avoir atteint, et même surpassé, les objectifs et les attentes reliés à ce projet de recherche. Les résultats sont cohérents et les conclusions tirées à partir de ceux-ci sont souvent très intéressantes.

Annexe I

Annexes se rapportant au chapitre 5

Graphique A1.1 Teneur en eau à la compaction-Formulation Université de Sherbrooke (valeurs moyennes)

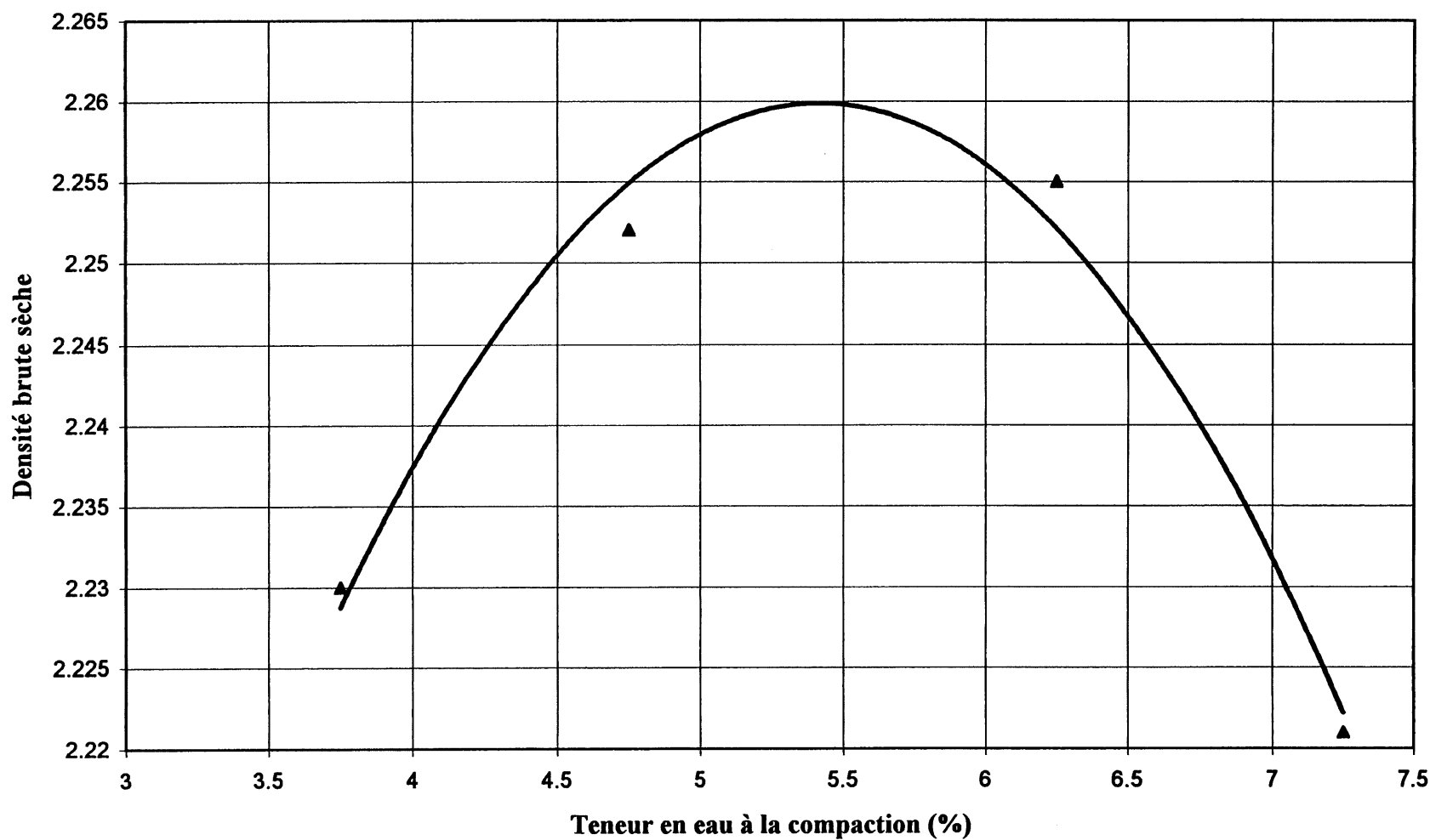


Tableau A1.1 Formulation Université de Sherbrooke
Détermination du pourcentage d'ajout de bitume optimal

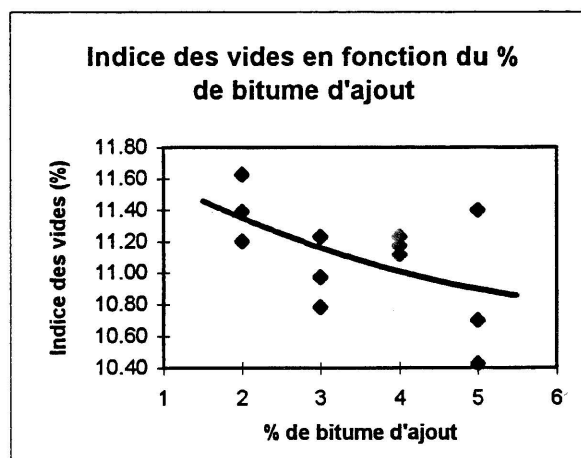
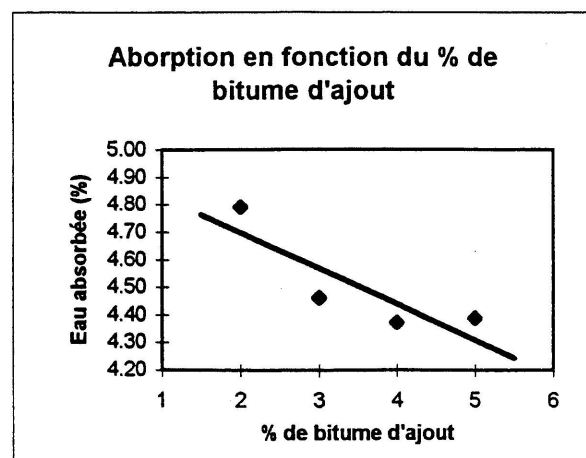
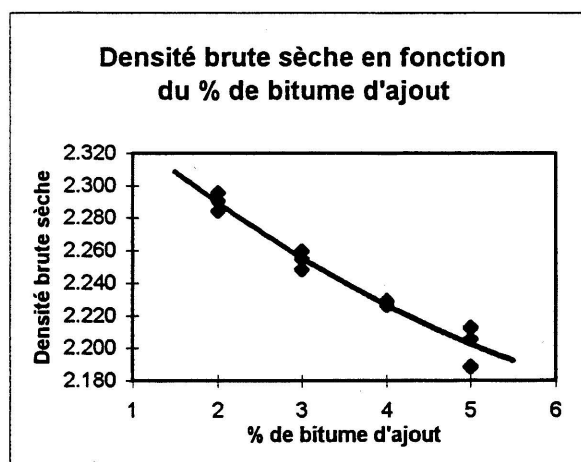
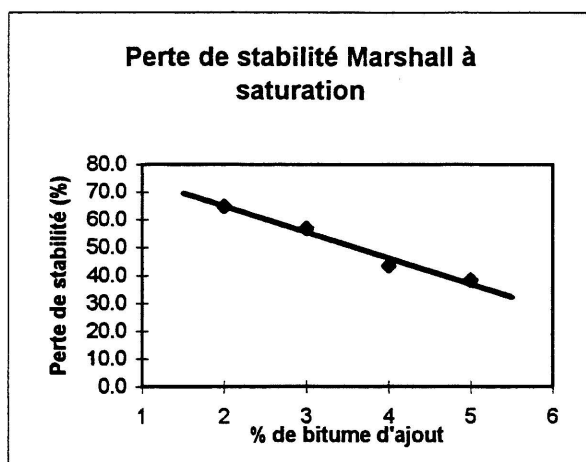
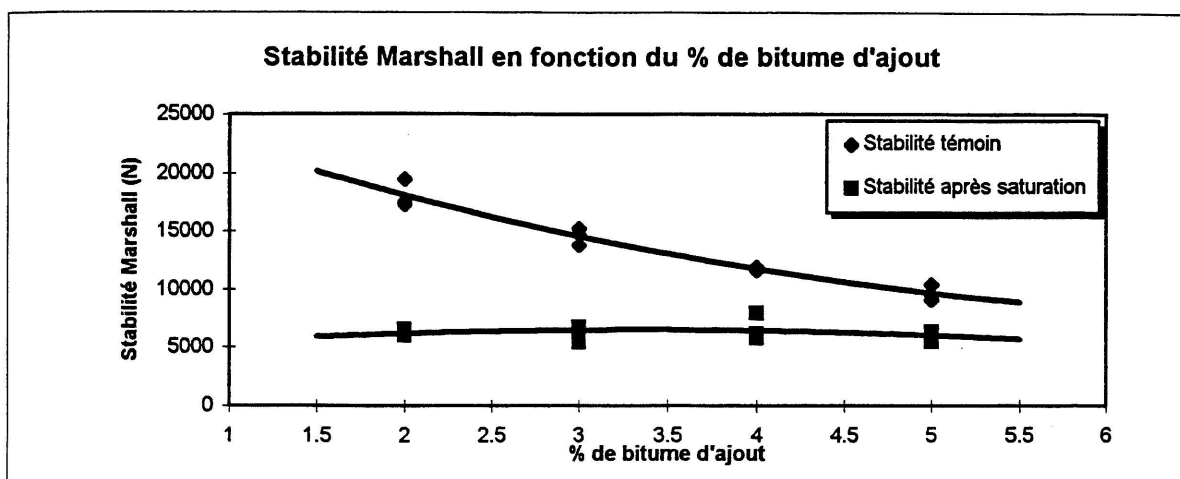
% de bitume d'ajout	Condition d'essai	Stabilité Marshall	Perte de stabilité (%)	Eau absorbée (%)	Densité brute sèche	Indice des vides (%)
2	T	17524			2.295	11.20
2	T	17292			2.284	11.63
2	T	19457	64.9	4.79	2.291	11.39
2	S	6247				
2	S	6533				
2	S	6292				
3	T	14732			2.249	11.23
3	T	15206			2.260	10.79
3	T	13838	56.8	4.46	2.255	10.98
3	S	6768				
3	S	6705				
3	S	5422				
4	T	11599			2.229	11.12
4	T	11884			2.226	11.23
4	T	11729	43.5	4.37	2.228	11.18
4	S	7958				
4	S	6162				
4	S	5766				
5	T	9526			2.206	10.70
5	T	9088			2.188	11.40
5	T	10365	38.3	4.39	2.212	10.43
5	S	6307				
5	S	5467				
5	S	6114				

T: témoin

S: saturé

Note: Le pourcentage de bitume résiduel dans le matériau pulvérisé est de 0.9%. Par conséquent si il y a 2% de bitume d'ajout, le bitume résiduel total dans l'échantillon est de 2,9%.

Graphique A1.2 Formulation Université de Sherbrooke
Graphiques nécessaires à la détermination
du % de bitume d'ajout optimal



**Tableau A1.2 Résultats de densité brute sèche en fonction
de la procédure de compaction, liant CSS-1**

Procédure de compaction	Essai-densité brute sèche			Moyenne
	compression	Brésilien	Marshall	
10 cps/face				2.119
	2.127	2.100	2.127	
	2.113	2.114	2.110	
	2.132	2.115	2.130	
Moyenne	2.124	2.110	2.122	
30 cps/face				2.215
	2.212	2.224	2.214	
	2.215	2.195	2.214	
	2.218	2.212	2.229	
Moyenne	2.215	2.211	2.219	
50 cps/face				2.242
	2.247	2.229	2.237	
	2.240	2.238	2.248	
	2.252	2.244		
Moyenne	2.246	2.237	2.242	
60 cps/face				2.251
	2.263	2.248	2.247	
	2.251	2.242	2.267	
	2.237	2.246	2.261	
Moyenne	2.251	2.245	2.258	

**Tableau A1.3 Résultats de densité brute sèche en fonction
de la procédure de compaction, liant Stabicol**

Procédure de compaction	Essai-densité brute sèche			Moyenne
	compression	Brésilien	Marshall	
10 cps/face				
	2.133	2.137	2.136	
	2.142	2.127	2.146	2.136
	2.145	2.131	2.127	
Moyenne	2.140	2.132	2.136	
30 cps/face				
	2.268	2.252	2.265	
	2.250	2.249	2.257	2.257
	2.265	2.243	2.261	
Moyenne	2.261	2.248	2.261	
50 cps/face				
	2.286	2.286	2.284	
	2.284	2.298	2.297	2.293
	2.301	2.277	2.321	
Moyenne	2.290	2.287	2.301	
60 cps/face				
	2.295	2.303	2.299	
	2.280	2.276	2.285	2.294
	2.309	2.292	2.303	
Moyenne	2.295	2.290	2.296	

**Tableau A1.4 Résultats de densité brute sèche en fonction
de la procédure de compaction, liant CSS-1
étude de curage, essai Marshall**

Procédure de compaction	Essai Marshall cure-densité brute sèche			Moyenne
	+2 jours	+6 jours	+27 jours	
10 cps/face				2.123
	2.118	2.122	2.112	
	2.133	2.128	2.128	
	2.099	2.146	2.125	
Moyenne	2.117	2.132	2.122	
30 cps/face				2.227
	2.223	2.222	2.233	
	2.231	2.235	2.229	
	2.214	2.216	2.241	
Moyenne	2.223	2.225	2.234	
50 cps/face				2.252
	2.256	2.248	2.250	
	2.254	2.228	2.268	
	2.244	2.259	2.261	
Moyenne	2.252	2.245	2.260	
60 cps/face				2.255
	2.244	2.253	2.270	
	2.259	2.248	2.242	
	2.258	2.267	2.256	
Moyenne	2.254	2.256	2.256	

**Tableau A1.5 Résultats de densité brute sèche en fonction
de la procédure de compaction, liant Stabicol
étude de curage, essai Marshall**

Procédure de compaction	Essai Marshall cure-densité brute sèche				Moyenne
	+2 jours	+4 jours	+6 jours	+27 jours	
10 cps/face					2.127
	2.137	2.126	2.114	2.117	
	2.135	2.114	2.132	2.115	
	2.140	2.132	2.131	2.134	
Moyenne	2.137	2.124	2.126	2.122	
30 cps/face					2.255
	2.260	2.273	2.257	2.251	
	2.255	2.250	2.266	2.258	
	2.232	2.250	2.268	2.238	
Moyenne	2.249	2.258	2.264	2.249	
50 cps/face					2.290
	2.292	2.292	2.286	2.279	
	2.281	2.291	2.303	2.291	
	2.287	2.294	2.292		
Moyenne	2.287	2.292	2.293	2.285	
60 cps/face					2.299
	2.300	2.296	2.309	2.294	
	2.297	2.298	2.300	2.290	
	2.307	2.304	2.303	2.291	
Moyenne	2.301	2.300	2.304	2.292	

**Tableau A1.6 Absorption d'eau à la saturation en fonction
de la procédure de compaction, du liant,
de l'essai et du temps de cure**

Essai et curage	Procédure de compaction	CSS-1	Stabicol
Compression simple	10 cps/face	8.01%	8.26%
	30 cps/face	5.76%	5.40%
	50 cps/face	5.36%	4.65%
	60 cps/face	5.00%	4.16%
Brésilien	10 cps/face	7.81%	7.42%
	30 cps/face	5.54%	5.21%
	50 cps/face	5.00%	4.34%
	60 cps/face	5.06%	4.04%
Marshall cure normalisée	10 cps/face	7.81%	8.13%
	30 cps/face	5.54%	5.30%
	50 cps/face	5.20%	4.59%
	60 cps/face	4.85%	4.49%
Marshall cure normalisée +2 jours	10 cps/face	7.68%	7.65%
	30 cps/face	5.52%	4.90%
	50 cps/face	4.76%	4.33%
	60 cps/face	4.75%	3.90%
Marshall cure normalisée +4 jours	10 cps/face		7.47%
	30 cps/face		5.05%
	50 cps/face		4.49%
	60 cps/face		4.03%
Marshall cure normalisée +6 jours	10 cps/face	7.22%	7.93%
	30 cps/face	5.56%	4.81%
	50 cps/face	4.86%	4.24%
	60 cps/face	4.76%	4.09%
Marshall cure normalisée +27 jours	10 cps/face	7.47%	7.89%
	30 cps/face	5.41%	5.40%
	50 cps/face	4.66%	4.41%
	60 cps/face	4.65%	4.26%

Annexe 2

Annexes se rapportant au chapitre 6

Tableau A2.1 Résultats essai Marshall-cure normalisée-liant CSS-1 et Stabicol

Procédure de compaction	Témoïn ou Saturé	CSS-1					Stabicol				
		Stabilité corrigée (N)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Abs. à la saturation	Déf. moyenne (mm)	Stabilité corrigée (N)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Abs. à la saturation	Déf. moyenne (mm)
10 cps/face	T	6185	2,127			3,625	9103	2,136			1,625
10 cps/face	T	7357	2,110			3,625	9789	2,146			1,5
10 cps/face	T	5590	2,130	56,3%	7,81%	3,25	8539	2,127	46,2%	8,13%	2
10 cps/face	S	2901				3,25	5224				1,5
10 cps/face	S	3132				4,25	4688				1,75
10 cps/face	S	2332				3,875	4851				1,5
30 cps/face	T	11187	2,214			3,875	19599	2,265			1,875
30 cps/face	T	13696	2,214			4,375	20216	2,257			2,25
30 cps/face	T	11927	2,229	51,2%	5,54%		19707	2,261	30,9%	5,30%	2,625
30 cps/face	S	5911				3,5	13235				2,25
30 cps/face	S	6249				3,625	13562				2,25
30 cps/face	S	5808				3,5	14306				1,875
50 cps/face	T	14346	2,237			3,75	25877	2,284			2,25
50 cps/face	T	14919	2,248			3,5	25266	2,297			2,375
50 cps/face	T			52,3%	5,20%		29560	2,321	37,7%	4,59%	2,625
50 cps/face	S	5945				2,875	16973				2,25
50 cps/face	S	7151				3,125	17052				2,5
50 cps/face	S	7828				4	16283				2,375
60 cps/face	T	15943	2,247			3,625	28896	2,299			2,875
60 cps/face	T	16906	2,267			3,625	21912	2,285			2,375
60 cps/face	T	15997	2,261	55,2%	4,85%	3,375	25463	2,303	25,4%	4,49%	3
60 cps/face	S	6969				3,25	20104				3,25
60 cps/face	S	7973				3,75	18960				2,625
60 cps/face	S	6953				3,75	17809				2,375

Tableau A2.2 Résultats essai Marshall-cure normalisée + 2 jours-liant CSS-1 et Stabicol

[illegible]

Tableau A2.3 Résultats essai Marshall
cure normalisée + 4 jours pour liant Stabicol et + 6 jours pour liant CSS-1 (lot #1)

Procédure de compaction	Témoin ou Saturé	CSS-1					Stabicol				
		Stabilité corrigée (N)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Abs. à la saturation	Déf. moyenne (mm)	Stabilité corrigée (N)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Abs. à la saturation	Déf. moyenne (mm)
10 cps/face	T	6373	2,099			5,25	8907	2,126			1,75
10 cps/face	T	6613	2,104			3,875	8191	2,114			1,75
10 cps/face	T	6630	2,094	40,3%	8,05%	3,625	8416	2,132	29,6%	7,47%	1,5
10 cps/face	S	3949				3,375	6006				1,875
10 cps/face	S	4283				4	5191				1,25
10 cps/face	S	3487				3,75	6767				1,25
30 cps/face	T	12064	2,194			4,25	26250	2,273			2,625
30 cps/face	T	12961	2,187			4,125	23101	2,250			2,375
30 cps/face	T	12909	2,215	48,0%	5,79%	3,5	22597	2,250	38,9%	5,05%	2
30 cps/face	S	7062				3	13550				1,75
30 cps/face	S	6426				4,125	15061				1,625
30 cps/face	S	6223				4,25	15354				1,75
50 cps/face	T	15857	2,240			4,125	31196	2,292			2,5
50 cps/face	T	12436	2,216			4,5	24719	2,291			3,375
50 cps/face	T	16185	2,230	39,2%	5,41%	4	27266	2,294	32,5%	4,49%	2,375
50 cps/face	S	9336				3,75	18148				1,75
50 cps/face	S	8925				3,5	17876				1,875
50 cps/face	S	8780				3,25	20092				2,125
60 cps/face	T	12854	2,247			3,875	31912	2,296			2,625
60 cps/face	T	14035	2,241			4	28774	2,298			2,5
60 cps/face	T	14336	2,233	40,8%	5,07%	4	31949	2,304	34,3%	4,03%	2,625
60 cps/face	S	8026				4	19205				2,5
60 cps/face	S	7841				3,625	23255				2
60 cps/face	S	8522				3,75	18399				2

Tableau A2.4 Résultats essai Marshall-cure normalisée + 6 jours-liant CSS-1 (lot #2) et Stabicol

[illegible]

Tableau A2.5 Résultats essai Marshall-cure normalisée + 27 jours-liant CSS-1 et Stabicol

[illegible]

Tableau A2.6 Résultats essai Brésilien-cure normalisée-liant CSS-1 et Stabicol

Procédure de compaction	Témoin ou Saturé	CSS-1				Stabicol			
		Résistance en tension (kPa)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Abs. à la saturation	Résistance en tension (kPa)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Abs. à la saturation
10 cps/face	T	66.3	2.100			104.7	2.137		
10 cps/face	T	54.9	2.114			77.3	2.127		
10 cps/face	T	66.2	2.115	73.55%	7.81%	109.7	2.131	59.8%	7.42%
10 cps/face	S	16.5				50.4			
10 cps/face	S	22.0				33.5			
10 cps/face	S	11.1				33.3			
30 cps/face	T	143.8	2.224			233.9	2.252		
30 cps/face	T	154.4	2.195			239.5	2.249		
30 cps/face	T	122.1	2.212	62.50%	5.54%	192.3	2.243	57.3%	5.21%
30 cps/face	S	66.7				89.4			
30 cps/face	S	38.2				89.1			
30 cps/face	S	44.2				105.4			
50 cps/face	T	163.5	2.229			279.4	2.286		
50 cps/face	T	164.4	2.238			241.4	2.298		
50 cps/face	T	143.6	2.244	64.09%	5.00%	259.5	2.277	41.8%	4.34%
50 cps/face	S	44.0				157.2			
50 cps/face	S	65.4				139.9			
50 cps/face	S	60.0				156.8			
60 cps/face	T	164.5	2.248			259.2	2.303		
60 cps/face	T	176.1	2.242			224.8	2.276		
60 cps/face	T	154.1	2.246	62.50%	5.06%	292.3	2.292	44.1%	4.04%
60 cps/face	S	77.0				129.4			
60 cps/face	S	53.9				134.6			
60 cps/face	S	54.6				169.9			

Tableau A2.7 Qualité des fissures, essais Brésiliens, liant CSS-1

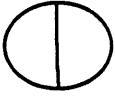
















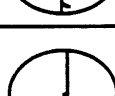






Essai après saturation			Témoin		
Procédure de compaction	Commentaire	Dessin de la fissure	Procédure de compaction	Commentaire	Dessin de la fissure
10 coups/face	Fissure quasi parfaite		10 coups/face	Imperfection grave	
10 coups/face	Imperfection grave		10 coups/face	Imperfection légère	
10 coups/face	Fissure quasi parfaite		10 coups/face	Imperfection grave	
30 coups/face	Fissure quasi parfaite		30 coups/face	Imperfection grave	
30 coups/face	Fissure quasi parfaite		30 coups/face	Imperfection légère	
30 coups/face	Imperfection légère		30 coups/face	Imperfection légère	
50 coups/face	Imperfection légère		50 coups/face	Rupture différente	
50 coups/face	Imperfection grave		50 coups/face	Imperfection grave	
50 coups/face	Imperfection grave		50 coups/face	Imperfection légère	
60 coups/face	Fissure quasi parfaite		60 coups/face	Fissure quasi parfaite	
60 coups/face	Imperfection légère		60 coups/face	Fissure quasi parfaite	
60 coups/face	Fissure quasi parfaite		60 coups/face	Imperfection légère	

Tableau A2.8 Qualité des fissures, essais Brésiliens, liant Stabicol

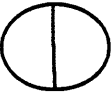
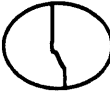
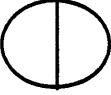



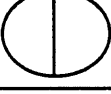

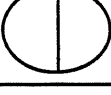

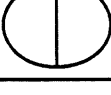












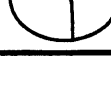
Essai après saturation			Témoin		
Procédure de compaction	Commentaire	Dessin de la fissure	Procédure de compaction	Commentaire	Dessin de la fissure
10 coups/face	Fissure quasi parfaite		10 coups/face	Imperfection légère	
10 coups/face	Fissure quasi parfaite		10 coups/face	Rupture différente	
10 coups/face	Fissure quasi parfaite		10 coups/face	Imperfection grave	
30 coups/face	Fissure quasi parfaite		30 coups/face	Imperfection légère	
30 coups/face	Fissure quasi parfaite		30 coups/face	Fissure quasi parfaite	
30 coups/face	Fissure quasi parfaite		30 coups/face	Fissure quasi parfaite	
50 coups/face	Imperfection légère		50 coups/face	Fissure quasi parfaite	
50 coups/face	Imperfection légère		50 coups/face	Fissure quasi parfaite	
50 coups/face	Fissure quasi parfaite		50 coups/face	Imperfection grave	
60 coups/face	Fissure quasi parfaite		60 coups/face	Imperfection légère	
60 coups/face	Fissure quasi parfaite		60 coups/face	Fissure quasi parfaite	
60 coups/face	Imperfection légère		60 coups/face	Imperfection légère	

Tableau A2.9 Résultats essai compression simple-cure normalisée-liant CSS-1 et Stabicol

Procédure de comp.	Témoin ou Saturé	CSS-1					Stabicol				
		Résistance en compression (MPa)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Taux de chargement (kPa/sec.)	Abs. à la saturation	Résistance en compression (MPa)	Densité brute sèche	Perte à saturation	Taux de chargement (kPa/sec.)	Abs. à la saturation
10 cps/face	T	0.93	2.127		133		1.28	2.137		257	
10 cps/face	T	0.84	2.113		105		1.66	2.127		237	
10 cps/face	T	0.84	2.132	42.36%	105	8.01%	1.47	2.131	59.8%	294	7.42%
10 cps/face	S	0.46			76		0.83			166	
10 cps/face	S	0.49			81		1.04			209	
10 cps/face	S	0.56			93		1.13			188	
30 cps/face	T	1.27	2.212		115		2.37	2.252		237	
30 cps/face	T	1.32	2.215		120		2.51	2.249		314	
30 cps/face	T	1.20	2.218	29.1%	120	5.76%	2.53	2.243	57.3%	211	5.21%
30 cps/face	S	1.02			128		2.39			478	
30 cps/face	S	0.99			124		2.30			288	
30 cps/face	S	0.67			96		2.45			245	
50 cps/face	T	1.38	2.247		69		2.53	2.286		211	
50 cps/face	T	1.31	2.240		119		2.49	2.298		226	
50 cps/face	T	1.39	2.252	32.9%	126	5.36%	3.58	2.277	41.8%	224	4.34%
50 cps/face	S	0.98			98		2.43			243	
50 cps/face	S	0.92			103		2.42			269	
50 cps/face	S	0.83			118		2.19			219	
60 cps/face	T	1.37	2.263		124		4.31	2.303			
60 cps/face	T	1.25	2.251		125		3.94	2.276		358	
60 cps/face	T	1.33	2.237	41.09%	133	5.00%	4.01	2.292	44.1%	286	4.04%
60 cps/face	S	0.71			102		2.49			227	
60 cps/face	S	0.89			127		2.23			186	
60 cps/face	S	0.72			91		2.46			246	

Tableau A2.10 Résultats CBR, variation de la densité, granulat

CBR granulat immergé et non-immergé						W%				
Densité #d'essai	CBR, pénétration					théorique après immersion	théorique après cure	théorique finale	finale réelle	
	0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"				1 ^{er} pouce	Moyenne
2.147	26	33	37	38	41		0.0500	0.0500	0.0478	0.0478
2.221	47	62	69	73	77		0.0500	0.0500	0.0487	0.0487
2.250	60	76	82	87	93		0.0500	0.0500	0.0481	0.0481
2.318	72	96	112	125	139		0.0500	0.0497	0.0460	0.0460
2.337	83	109	123	127	133		0.0500	0.0496	0.0465	0.0465
2.355	92	120	139	149	162		0.0500	0.0493	0.0487	0.0487
2.355	67	88	104	114	126	0.0537	0.0500	0.0514	0.0527	0.0486
2.323	83	111	132	143	159	0.0557	0.0500	0.0521	0.0503	0.0486
2.339	67	89	111	119	131	0.0546	0.0500	0.0509	0.0505	0.0498

Tableau A2.11 Résultats CBR sans immersion, variation de la densité, CSS-1

CBR CSS-1 non-immergé						W%			
Densité #d'essai	CBR, pénétration					théorique après cure	théorique finale	finale réelle	
	0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"			1 ^{er} pouce	Moyenne
2.128	16	19	20	19	20	0.0427	0.0427	0.0408	0.0470
2.135	17	19	20	20	20	0.0434	0.0434	0.0431	0.0437
2.137	23	25	26	26	26	0.0432	0.0432	0.0363	0.0433
2.148	19	23	24	24	25	0.0439	0.0439	0.0387	0.0431
2.171	16	19	21	20	21	0.0437	0.0437	0.0396	0.0444
2.185	20	23	25	25	24	0.0444	0.0444	0.0370	0.0448
2.202	19	24	28	29	30	0.0420	0.0420	0.0343	0.0421
2.207	18	24	28	29	30	0.0426	0.0426	0.0336	0.0425
2.209	17	22	24	25	26	0.0405	0.0405	0.0386	0.0408
2.209	20	28	33	34	36	0.0424	0.0424	0.0331	0.0426
2.220	19	25	28	30	32	0.0385	0.0385	0.0316	0.0377
2.222	16	21	23	23	24	0.0411	0.0411	0.0333	0.0416

Tableau A2.12 Résultats CBR sans immersion, variation de la densité, Stabicol

CBR Stabicol non-immergé						W%			
Densité #d'essai	CBR, pénétration					théorique après cure	théorique finale	finale réelle	
	0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"			1 ^{er} pouce	Moyenne
2.151	107	117	121	117		0.0431	0.0431	0.0349	0.0412
2.165	111	135	137	133		0.0427	0.0427	0.0360	0.0396
2.221	100	131	146	146		0.0456	0.0456	0.0353	0.0440
2.242	128	166	182	186		0.0425	0.0425	0.0283	0.0390
2.257	100	133	154	159		0.0458	0.0458	0.0365	0.0456
2.260	110	137	150	154		0.0425	0.0425	0.0292	0.0413
2.266	127	160	178	184		0.0455	0.0455	0.0314	0.0413
2.278	117	148	162	171		0.0453	0.0453	0.0367	0.0425
2.282	93	129	148	152		0.0463	0.0463	0.0359	0.0444
2.288	101	133	146	149		0.0461	0.0461	0.0346	0.0447

Tableau A2.13 Résultats CBR avec immersion, variation de la densité, CSS-1

CBR CSS-1 immergé						W%				
Densité #d'essai	CBR, pénétration					théorique après immersion	théorique après cure	théorique finale	finale réelle	
	0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"				1 ^{er} pouce	Moyenne
2.126	12	13	13	13	14	0.0692	0.0503	0.0692	0.0578	0.0638
2.146	16	19	19	19	19	0.0647	0.0499	0.0647	0.0572	0.0556
2.179	14	18	21	22	24	0.0577	0.0503	0.0577	0.0544	0.0556
2.198	13	17	19	19	20	0.0578	0.0504	0.0544	0.0529	0.0507
2.208	18	22	22	22	21	0.0572	0.0498	0.0535	0.0518	0.0515
2.213	12	15	18	18	19	0.0560	0.0495	0.0531	0.0542	0.0536
2.225	14	18	21	21	22	0.0544	0.0480	0.0514	0.0464	0.0492
2.232	22	29	33	35	36	0.0543	0.0481	0.0506	0.0503	0.0502

Tableau A2.14 Résultats CBR avec immersion, variation de la densité, Stabicol

CBR Stabicol immergé						W%				
Densité #d'essai	CBR, pénétration					théorique après immersion	théorique après cure	théorique finale	finale réelle	
	0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"				1 ^{er} pouce	Moyenne
2.154	88	93	96	93	94	0.0725	0.0483	0.0725	0.0571	0.0664
2.164	107	111	111	105	100	0.0702	0.0477	0.0702	0.0539	0.0572
2.216	95	119	128	130	135	0.0656	0.0495	0.0656	0.0574	0.0574
2.223	100	127	133	130	131	0.0610	0.0496	0.0586	0.0558	0.0559
2.245	83	109	125	129	135	0.0611	0.0499	0.0585	0.0528	0.0562
2.260	92	121	134	138	145	0.0604	0.0496	0.0585	0.0545	0.0541
2.273	107	138	155	159		0.0566	0.0484	0.0552	0.0489	0.0531
2.277	93	119	134	138	145	0.0573	0.0500	0.0556	0.0529	0.0524

Tableau A2.15 Résultats CBR sans immersion, étude de curage, CSS-1

Nombre d'heures de cure	CBR CSS-1 étude de curage						W%				% de compaction
	essai	CBR, pénétration					théorique après cure	théorique finale	finale réelle		
		0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"			1er pouce	Moyenne	
0											
	1	6	9	10	11	12	0.0550	0.0539	0.0523	0.0523	0.990
	2	11	15	18	19	20	0.0550	0.0532	0.0522	0.0522	0.990
	3	8	10	12	13	14	0.0550	0.0531	0.0532	0.0532	0.995
Moyenne		8	11	13	14	16	0.0550	0.0534	0.0526	0.0526	0.991
24	1	26	33	37	38	41	0.0337	0.0337	0.0262	0.0320	0.992
	2	31	38	40	41	42	0.0340	0.0340	0.0225	0.0311	0.990
	3	24	32	35	36	38	0.0356	0.0356	0.0253	0.0338	0.988
Moyenne		27	34	37	38	40	0.0344	0.0344	0.0247	0.0323	0.990
48	1	30	38	42	43	46	0.0294	0.0294	0.0193	0.0264	0.993
	2	30	37	41	42	42	0.0312	0.0312	0.0198	0.0298	0.995
	3	29	34	36	37	39	0.0306	0.0306	0.0204	0.0295	0.995
Moyenne		29	36	40	41	42	0.0304	0.0304	0.0198	0.0286	0.994
72	1	35	40	43	43	44	0.0236	0.0236	0.0175	0.0233	0.993
	2	29	33	35	35	36	0.0259	0.0259	0.0195	0.0250	0.997
	3	26	33	35	35	37	0.0264	0.0264	0.0195	0.0252	0.988
Moyenne		30	35	38	38	39	0.0253	0.0253	0.0188	0.0245	0.993
168	1	50	59	62	62	64	0.0165	0.0165	0.0119	0.0157	0.995
	2	55	64	66	64	62	0.0187	0.0187	0.0096	0.0179	0.991
Moyenne		52	62	64	63	63	0.0176	0.0176	0.0107	0.0168	0.993

Tableau A2.16 Résultats CBR sans immersion, étude de curage, Stabicol

Nombre d'heure de cure	CBR Stabicol étude de curage						W%				% de compaction
	essai	CBR, pénétration					théorique après cure	théorique finale	finale réelle		
		0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"			1er pouce	Moyenne	
0											
	1	22	30	35	39	43	0.0550	0.0546	0.0542	0.0542	0.993
	2	29	38	45	49	53	0.0550	0.0546	0.0539	0.0539	0.991
	3	26	35	40	43	47	0.0550	0.0543	0.0527	0.0527	0.989
Moyenne		26	34	40	43	48	0.0550	0.0545	0.0536	0.0536	0.991
24	1	101	132	148	154		0.0413	0.0413	0.0271	0.0378	0.990
	2	108	140	153	154		0.0419	0.0419	0.0275	0.0394	0.991
	3	82	108	118	120		0.0420	0.0420	0.0289	0.0401	0.980
Moyenne		97	127	140	143		0.0417	0.0417	0.0278	0.0391	0.987
48	1	122	156	169			0.0390	0.0390	0.0244	0.0356	0.987
	2	153	188	177			0.0389	0.0389	0.0260	0.0373	0.986
	3	133	168	171			0.0398	0.0398	0.0258	0.0357	0.986
Moyenne		136	171	172			0.0392	0.0392	0.0254	0.0362	0.987
72	1	157	191	211			0.0387	0.0387	0.0210		0.989
	2	160	194	211			0.0393	0.0393	0.0246	0.0364	0.986
	3	143	180	199			0.0393	0.0393	0.0226	0.0371	0.987
Moyenne		153	189	207			0.0391	0.0391	0.0227	0.0367	0.988
168	1	200	236				0.0326	0.0326	0.0168	0.0302	0.998
	2	188	223				0.0346	0.0346	0.0173	0.0337	0.988
	3	200	231				0.0336	0.0336	0.0177	0.0327	1.000
Moyenne		196	230				0.0336	0.0336	0.0173	0.0322	0.995

Tableau A2.17 Résultats CBR avec immersion, étude de curage, CSS-1

Nombre d'heures de cure	CBR Stabicol étude de curage						W%					% de compaction
	essai	CBR, pénétration					théorique après immersion	théorique après cure	théorique finale	finale réelle		
		0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"				1er pouce	Moyenne	
0												
	1	11	15	17	17	18	0.0587	0.0550	0.0553	0.0553	0.054	0.987
	2	10	12	14	15	16	0.0576	0.0550	0.0546	0.0545	0.055	0.989
	3	12	15	16	17	17	0.0578	0.0550	0.0549	0.0501	0.054	0.995
Moyenne		11	14	16	16	17	0.0580	0.0550	0.0549	0.0533	0.054	0.990
24	1	15	20	23	23	25	0.0458	0.0357	0.0430	0.0372	0.043	0.996
	2	24	31	33	33	34	0.0459	0.0357	0.0428	0.0336	0.042	0.999
	3	20	26	29	30	31	0.0468	0.0349	0.0440	0.0377	0.043	0.998
Moyenne		20	25	29	29	30	0.0462	0.0354	0.0433	0.0361	0.042	0.998
48	1	25	33	36	37	39	0.0432	0.0291	0.0399	0.0315	0.039	0.990
	2	18	23	26	27	28	0.0445	0.0289	0.0410	0.0332	0.040	0.988
	3	20	26	28	29	29	0.0451	0.0300	0.0416	0.0350	0.041	0.988
Moyenne		21	27	30	31	32	0.0442	0.0293	0.0408	0.0333	0.040	0.989
72	1	26	34	38	39	40	0.0424	0.0273	0.0398	0.0294	0.037	0.993
	2	27	34	37	39	40	0.0410	0.0259	0.0376	0.0276	0.036	0.994
	3	23	28	29	32	33	0.0424	0.0267	0.0392	0.0299	0.037	0.993
Moyenne		25	32	35	36	38	0.0420	0.0266	0.0389	0.0290	0.036	0.993
168	1	33	43	48	48	49	0.0341	0.0170	0.0312	0.0240	0.030	0.993
	2	29	35	39	40	41	0.0353	0.0192	0.0328	0.0246	0.031	0.991
	3	27	34	38	39	40	0.0379	0.0221	0.0348	0.0265	0.032	0.995
Moyenne		30	38	42	42	44	0.0358	0.0194	0.0329	0.0250	0.031	0.993

Tableau A2.18 Résultats CBR avec immersion, étude de curage, Stabicol

Nombre d'heure de cure	CBR Stabicol étude de curage						W%					% de compaction
	essai	CBR, pénétration					théorique après immersion	théorique après cure	théorique finale	finale réelle		
		0,1"	0,2"	0,3"	0,4"	0,5"				1er pouce	Moyenne	
0												
	1	73	96	105	106	107	0.0611	0.0550	0.0585			0.980
	2	81	106	116	119	123	0.0603	0.0550	0.0578			0.993
	3	90	112	123	127	132	0.0607	0.0550	0.0585			0.984
Moyenne		81	105	115	117	121	0.0607	0.0550	0.0583			0.986
24	1	125	158	173			0.0548	0.0421	0.0530	0.0386	0.047	0.991
	2	120	150	165			0.0536	0.0414	0.0517	0.0395	0.048	0.992
	3	119	157	178			0.0551	0.0413	0.0529	0.0364	0.047	0.988
	Moyenne		121	155	172			0.0545	0.0416	0.0525	0.0382	0.047
48	1	130	161	172			0.0546	0.0388	0.0527	0.0360	0.049	0.984
	2	135	163	175			0.0557	0.0390	0.0537	0.0360	0.047	0.983
	3	135	169	181			0.0567	0.0394	0.0546	0.0378	0.048	0.983
	Moyenne		133	164	176			0.0557	0.0391	0.0537	0.0366	0.048
72	1	151	184	198			0.0514	0.0371	0.0500			0.989
	2	133	164	182			0.0539	0.0375	0.0514			0.983
	3	141	187	198			0.0534	0.0376	0.0517			0.985
	Moyenne		142	178	193			0.0529	0.0374	0.0510		
168	1	185	228				0.0438	0.0275	0.0421	0.0252	0.039	0.985
	2	181	215				0.0489	0.0339	0.0474	0.0313	0.044	0.985
	3	186	224				0.0452	0.0318	0.0436	0.0286	0.039	0.989
	Moyenne		184	222				0.0460	0.0311	0.0444	0.0284	0.041

Tableau A2.19 Résultats étude de gel-dégel CSS-1 et Stabicol

Type de cure et nombre de cycles	Condition d'essai	CSS-1			Stabicol	
		Stabilité Marshall (N)	W%	Def. (mm)	Stabilité Marshall (N)	W%
28 jours de cure sans cycle de gel-dégel	Témoin	18496	0.78%	3.8	30190	0.66%
		18205	0.74%	4.1	25990	0.68%
		18842	0.79%	4.0	28542	0.66%
	Saturé	12419	5.68%	4.0	13635	6.25%
		12101	5.60%	4.0	14391	6.23%
		12448	5.65%	4.8	15938	6.17%
78 jours de cure sans cycle de gel-dégel	Témoin	21263	0.50%	5.5	36145	0.57%
		25110	0.57%	4.6	37266	0.59%
		20450	0.55%	4.1	36146	0.59%
	Saturé	18849	5.25%	4.8	14035	6.13%
		12167	5.69%	4.3	17537	6.25%
		17311	5.43%	4.8	16398	6.01%
28 jours de cure et 10 cycles de gel-dégel	Témoin	22052	0.51%	4.4	40749	0.60%
		20943	0.50%	4.6	42016	0.76%
		22172	0.49%	4.4	39813	0.64%
	Saturé	6163	7.26%	10.0	ruine	
		6613	7.35%	10.0	ruine	
		5937	7.41%	10.0	ruine	
28 jours de cure et 20 cycles de gel-dégel	Témoin	23617	0.58%	4.3	41315	0.68%
		19245	0.51%	4.6	39159	0.62%
		19533	0.47%	4.4	43943	0.72%
	Saturé	2602	10.17%	10.0	ruine	
		4092	8.23%	10.0	ruine	
		4556	8.58%	10.0	ruine	
28 jours de cure et 30 cycles de gel-dégel	Témoin	19427	0.48%	4.4	35184	0.80%
		20178	0.47%	4.1	39739	0.70%
		21773	0.48%	4.4	41389	0.61%
	Saturé	2834	9.59%	10.0	ruine	
		4476	8.32%	10.0	ruine	
		4145	8.58%	10.0	ruine	
28 jours de cure et 50 cycles de gel-dégel	Témoin	18032	0.49%	4.4		
		19717	0.48%	4.1	35671	0.82%
		19187	0.47%	4.8	39675	0.82%
	Saturé	1685	10.23%	10.0	ruine	
		2306	9.87%	10.0	ruine	
		2926	9.53%	10.0	ruine	

N.B.: Les résultats pour le Stabicol témoin n'ont pas été corrigés ici pour l'utilisation de la presse Balwin. Le pourcentage de compaction est de 99,6% et 98,9% pour le CSS-1 et Stabicol respectivement (résultats basés sur trois essais seulement)

Annexe 3

Annexes se rapportant au chapitre 7

Tableau A3.1 Résultats étude de teneur en eau après curage

Liant	Procédure de compaction	Teneur en eau après curage (%)	Liant	Procédure de compaction	Teneur en eau après curage (%)
C S S - 1			S t a b i l i t		
	10 coups/face	0.687		10 coups/face	1.221
	10 coups/face	0.752		10 coups/face	1.194
	10 coups/face	0.635		10 coups/face	1.251
	10 coups/face	0.770		10 coups/face	1.290
	10 coups/face	0.643		10 coups/face	1.216
	10 coups/face	0.665		10 coups/face	1.325
	moyenne	0.692		moyenne	1.249
	30 coups/face	0.835		30 coups/face	1.363
	30 coups/face	0.836		30 coups/face	1.456
	30 coups/face	0.893		30 coups/face	1.369
	30 coups/face	0.917		30 coups/face	1.468
	30 coups/face	0.908		30 coups/face	1.472
	30 coups/face	0.891		30 coups/face	1.414
	moyenne	0.880		moyenne	1.424
	50 coups/face	0.890		50 coups/face	1.516
	50 coups/face	0.922		50 coups/face	1.384
	50 coups/face	0.890		50 coups/face	1.487
	50 coups/face	0.918		50 coups/face	1.453
	50 coups/face	0.906		50 coups/face	1.472
	50 coups/face	0.942		50 coups/face	1.429
	moyenne	0.911		moyenne	1.457
	60 coups/face	0.935		60 coups/face	1.486
	60 coups/face	0.933		60 coups/face	1.500
	60 coups/face	0.880		60 coups/face	1.560
	60 coups/face	0.923		60 coups/face	1.481
	60 coups/face	0.880		60 coups/face	1.503
	60 coups/face	0.923		60 coups/face	1.520
	moyenne	0.912		moyenne	1.508

Tableau A3.2
Résultats complets étude sur l'utilisation de l'essai de densité brute
Liant CSS-1

Procédure de compaction	Densité				
	Immersion 10 sec.	Immersion 3 minutes	Immersion théorique	Immersion avec paraffine	Par dimensionnement
10 coups/face	2.124	2.128	2.100	2.117	1.988
10 coups/face	2.114	2.119	2.102	2.119	2.005
10 coups/face	2.123	2.127	2.100	2.117	2.008
10 coups/face	2.126	2.137	2.112	2.128	2.028
10 coups/face	2.110	2.115	2.089	2.107	1.996
10 coups/face	2.097	2.108	2.080	2.097	1.990
30 coups/face	2.214	2.225	2.205	2.219	2.147
30 coups/face	2.216	2.221	2.207	2.221	2.150
30 coups/face	2.217	2.229	2.213	2.227	2.146
30 coups/face	2.218	2.225	2.209	2.223	2.151
30 coups/face	2.215	2.222	2.203	2.217	2.137
30 coups/face	2.201	2.207	2.187	2.201	2.128
50 coups/face	2.234	2.241	2.226	2.240	2.187
50 coups/face	2.246	2.251	2.236	2.249	2.199
50 coups/face	2.246	2.254	2.239	2.252	2.185
50 coups/face	2.249	2.252	2.236	2.250	2.201
50 coups/face	2.236	2.240	2.224	2.237	2.183
50 coups/face	2.239	2.242	2.233	2.246	2.194
60 coups/face	2.260	2.264	2.246	2.260	2.201
60 coups/face	2.243	2.251	2.234	2.248	2.190
60 coups/face	2.256	2.261	2.245	2.260	2.206
60 coups/face	2.257	2.265	2.247	2.261	2.207
60 coups/face	2.244	2.250	2.230	2.245	2.194
60 coups/face	2.241	2.245	2.229	2.244	2.180

Tableau A3.3
Résultats complets étude sur l'utilisation de l'essai de densité brute
Liant Stabicol

Procédure de compaction	Densité				
	Immersion 10 sec.	Immersion 3 minutes	Immersion théorique	Immersion avec paraffine	Par dimensionnement
10 coups/face	2.141	2.157	2.149	2.172	2.012
10 coups/face	2.130	2.146	2.122	2.142	2.008
10 coups/face	2.143	2.155	2.137	2.153	2.013
10 coups/face	2.148	2.160	2.117	2.136	2.028
10 coups/face	2.149	2.161	2.150	2.166	2.024
10 coups/face	2.149	2.152	2.144	2.163	2.014
30 coups/face	2.271	2.273	2.264	2.279	2.215
30 coups/face	2.255	2.261	2.251	2.267	2.182
30 coups/face	2.268	2.275	2.260	2.274	2.202
30 coups/face	2.268	2.273	2.261	2.275	2.220
30 coups/face	2.262	2.268	2.252	2.267	2.202
30 coups/face	2.267	2.274	2.252	2.269	2.206
50 coups/face	2.295	2.299	2.288	2.300	2.236
50 coups/face	2.294	2.294	2.282	2.297	2.246
50 coups/face	2.288	2.291	2.277	2.291	2.242
50 coups/face	2.291	2.294	2.282	2.297	2.243
50 coups/face	2.298	2.301	2.289	2.303	2.235
50 coups/face	2.293	2.300	2.287	2.301	2.235
60 coups/face	2.309	2.311	2.290	2.312	2.267
60 coups/face	2.308	2.312	2.293	2.311	2.263
60 coups/face	2.309	2.311	2.295	2.311	2.270
60 coups/face	2.309	2.310	2.295	2.310	2.271
60 coups/face	2.284	2.287	2.279	2.294	2.250
60 coups/face	2.300	2.307	2.291	2.306	2.253

Annexe 4

Annexes se rapportant au chapitre 8

Tableau A4.1 Résultats à l'essai Dynaflect, planches d'essais CTED

	1995				1996			
	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)
Émulsion	21	346	319	41	24	430	239	47
	21	561	271	36	24	466	235	46
	23	304	322	43	24	296	315	48
	23	292	375	41	24	457	264	43
	20	584	261	37	24	592	230	42
	20	614	259	36	24	472	244	45
Moyenne	21	450	301	39	24	452	255	45
Écart-type		151	46	3		95	32	2
Intervalle(±)		121	37	2		76	26	2
Émulsion+ ciment	21	440	287	39	24	393	272	46
	21	360	297	42	24	419	254	46
	23	349	324	41	24	366	300	45
	23	434	276	40	24	432	256	45
	23	436	301	38	24	582	223	43
	23	466	267	39	24	403	255	47
Moyenne	22	414	292	40	24	433	260	45
Écart-type		48	20	1		77	25	1
Intervalle(±)		38	16	1		61	20	1
Émulsion+ chaux	21	398	289	41	24	403	255	47
	21	327	290	44	24	306	265	52
	23	352	316	41	24	407	257	46
	23	349	280	43	24	390	241	49
	22	492	258	39	24	512	217	46
	22	389	271	42	24	391	231	50
Moyenne	22	385	284	42	24	402	244	48
Écart-type		59	20	2		66	18	2
Intervalle(±)		47	16	1		53	14	2

Tableau A4.1 Résultats à l'essai Dynaflect, planches d'essais CTED
(suite)

	1995				1996			
	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)
Mousse	24	241	382	45	24	354	199	53
	24	213	388	48	24	325	270	49
	23	278	363	43	24	429	223	45
	23	243	389	45	24	445	230	44
	23	240	435	43	24	430	229	45
	23	212	414	47	24	254	315	54
Moyenne	23	238	395	45	24	373	244	48
Écart-type		24	25	2		75	41	4
Intervalle(±)		19	20	2		60	33	3
Mousse+ ciment	21	326	305	43	24	639	193	42
	21	536	238	40	24	399	261	45
	23	466	265	40	24	631	192	42
	23	614	220	39	24	554	187	45
	22	398	275	41	24	438	222	46
	22	514	253	39	24	433	210	48
Moyenne	22	476	259	40	24	516	211	45
Écart-type		103	30	2		106	28	2
Intervalle(±)		82	24	1		85	22	2
Mousse+ chaud	24	315	319	43	24	307	269	52
	24	299	297	45	24	276	309	50
	23	269	322	46	24	460	247	46
	23	287	331	44	24	489	253	44
	22	257	346	46	24	456	250	46
	22	278	403	41	24	637	223	43
Moyenne	23	284	336	44	24	438	259	47
Écart-type		21	36	2		131	29	3
Intervalle(±)		17	29	2		105	23	3

Tableau A4.1 Résultats à l'essai Dynaflect, planches d'essais CTED
(suite)

	1995				1996			
	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)	T°C	Module chaussée (MPa)	Module sol (MPa)	Déflexion calculée (10 ⁻² mm)
Hi-tech	24	738	246	38	28	403	255	47
	24	428	309	39	28	255	356	49
	26	602	260	39	28	394	249	48
	26	361	363	38	28	279	318	50
	26	836	262	35	28	409	271	45
	26	310	359	40	28	275	307	51
	24	270	325	43				
	24	286	342	41				
	26	214	385	41				
	26	492	342	37				
	26	255	361	41				
	26	358	346	39				
Moyenne	25	429	325	39	28	336	293	48
Écart-type		200	46	2		73	42	2
Intervalle(±)		113	26	1		58	33	2

Tableau A4.2 Résultats obtenus à l'essai FWD

	1995				1996			
	T°C	Chaînage (m)	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)	T°C	Chaînage (m)	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)
Emulsion	6	0+000	739	234	12	0+000	1822	189
	6	0+004	1255	156	12	0+004	1837	182
	6	0+008	1301	203	12	0+008	1616	203
	6	0+012	1088	284	12	0+012	1540	241
	6	0+016	891	260	12	0+016	2179	240
Moyenne			1055	227			1799	211
Écart-type			239	50			248	28
Intervalle (±)			209	44			218	25
Emulsion+ ciment	6	0+018	735	170	12	0+018	1371	242
	6	0+022	1100	370	12	0+022	2536	263
	6	0+026	1002	375	12	0+026	1727	271
	6	0+030	2978	162	12	0+030	2322	265
	6	0+033	2321	196	12	0+033	3232	292
Moyenne			1850	255			2454	267
Écart-type			962	108			621	18
Intervalle (±)			943	95			609	16
Emulsion+ chaux	6	0+035	1661	169	12	0+035	2261	284
	6	0+039	891	164	12	0+039	1933	223
	6	0+042	787	184	12	0+042	1908	225
	6	0+045	1054	152	12	0+045	1883	197
	6	0+048	836	233	12	0+048	1748	193
Moyenne			892	180			1868	224
Écart-type			116	32			83	36
Intervalle (±)			114	28			81	32

résultat rejeté car possiblement non-représentatif de la planche testée
(à cheval sur une frontière ou épaisseur utilisée dans le calcul erronée)

Tableau A4.2 Résultats obtenus à l'essai FWD

(suite)

	1995				1996			
	T°C	Chaînage (m)	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)	T°C	Chaînage (m)	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)
Mousse	6	0+063	2526	158	12	0+074	2071	231
	6	0+065	1761	168	12	0+076	931	205
	6	0+068	1048	158	12	0+078	1205	215
	6	0+070	809	171	12	0+081	1271	244
	6	0+072	857	183	12	0+083	1367	255
Moyenne			1119	168			1194	230
Écart-type			440	10			187	20
Intervalle (±)			432	9			183	18
Mousse+ ciment	6	0+053	684	173	12	0+063	1480	273
	6	0+055	4161	172	12	0+065	5363	352
	6	0+057	4262	174	12	0+068	4373	317
	6	0+059	5468	180	12	0+070	3157	273
					12	0+072	2572	252
Moyenne			4630	175			3866	293
Écart-type			727	4			1248	40
Intervalle (±)			823	4			1223	35
Mousse+ chaux	6	0+074	1240	119	12	0+053	1947	199
	6	0+076	1475	124	12	0+055	1336	202
	6	0+078	856	124	12	0+057	1654	222
	6	0+081	1477	110	12	0+059	2051	188
	6	0+083	2006	124				
Moyenne			1454	120			1680	203
Écart-type			470	6			358	14
Intervalle (±)			461	5			405	14

résultat rejeté car possiblement non-représentatif de la planche testée
(à cheval sur une frontière ou épaisseur utilisée dans le calcul erronée)

Tableau A4.2 Résultats obtenus à l'essai FWD
(suite)

	1995				1996			
	T°C	Chaînage (m)	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)	T°C	Chaînage (m)	Chaussée (MPa)	Fondation (MPa)
Hi-tech	6	0+086	15674	203	12	0+086	15090	248
	6	0+088	16577	286	12	0+088	13821	257
	6	0+090	20200	349	12	0+090	18525	326
	6	0+092	15764	304	12	0+092	7699	294
	6	0+094	15521	228	12	0+094	5660	223
	6	0+097	21549	191	12	0+097	15119	205
	6	0+100	27541	174	12	0+100	21277	197
Moyenne			20308	248			19305	250
Écart-type			4724	66			5507	47
Intervalle (±)			4141	49			4827	35

résultat rejeté car possiblement non-représentatif de la planche testée
(à cheval sur une frontière ou épaisseur utilisée dans le calcul erronée)

Tableau A4.3 Valeur de k et de E pour chaque matériau testé
Essai de plaque campagne de 1995 (suite)

Matériau Essai	Épaisseur (mm)	Charge (kPa)	Module de réaction "k" (MPa/m)	Module statique "E" (MPa)
Emulsion				
#1	165	365	nd	nd
		714	510	1312
		975	520	973
Moyenne			515	
#4	170	453	1053	387
		714	933	443
		975	1005	404
Moyenne			997	
Moyenne totale			756	
Emulsion+ciment				
#1	185	540	1662	24236
		714	978	24236
		975	911	39176
		1236	954	21707
Moyenne			1126	
#2	190	540	1565	1897
		714	1428	664
		975	1336	664
Moyenne			1443	
#3	200	540	1543	166000
		714	1335	4316
		975	975	2134
Moyenne			1284	
Moyenne totale			1284	

nd: non-disponible ip: inférieur à la pierre

Tableau A4.3 Valeur de k et de E pour chaque matériau testé
Essai de plaque campagne de 1995 (suite)

Matériau Essai	Épaisseur (mm)	Charge (kPa)	Module de réaction "k" (MPa/m)	Module statique "E" (MPa)
Emulsion+chaux				
#2	235	453	755	1660
		714	674	1494
		975	476	398
Moyenne			635	
#3	205	453	616	ip
		714	541	ip
		975	552	398
Moyenne			570	
Moyenne totale			602	
Mousse+ciment				
#1	180	540	1662	3652
		714	1763	6640
		975	1477	2490
Moyenne			1634	
#2	225	540	939	996
		714	927	498
		975	1005	498
Moyenne			957	
Moyenne totale			1296	
Mousse				
#1	220	453	387	ip
		714	322	ip
		975	240	ip
Moyenne			316	

nd: non-disponible ip: inférieur à la pierre

Tableau A4.3 Valeur de k et de E pour chaque matériau testé
Essai de plaque campagne de 1995 (suite)

Matériau Essai	Épaisseur (mm)	Charge (kPa)	Module de réaction "k" (MPa/m)	Module statique "E" (MPa)
Mousse+chaux				
#1	180	365	445	443
		714	352	332
		975	285	ip
Moyenne			361	
#2	230	365	348	ip
		714	315	ip
		975	239	ip
Moyenne			300	
Moyenne totale			331	

nd: non-disponible ip: inférieur à la pierre

Tableau A4.3 Valeur de k et de E pour chaque matériau testé
Essai de plaque campagne de 1995 (suite)

Matériau Essai	Épaisseur (mm)	Charge (kPa)	Module de réaction "k" (MPa/m)	Module statique "E" (MPa)
Hi-tech				
#1-1	130	453	444	1162
		714	430	1660
		975	464	1162
Moyenne			446	
#1-2	115	365	640	2490
		714	562	1826
		975	495	664
Moyenne			566	
#2-1	135	453	401	ip
		714	378	ip
		975	362	350
Moyenne			380	
#2-2	180	365	579	3320
		714	549	2490
		975	527	1217
Moyenne			552	
#2-3	205	453	552	830
		714	446	442
		975	451	664
Moyenne			483	
Moyenne totale			486	

nd: non-disponible ip: inférieur à la pierre

Tableau A4.4 Modules d'élasticité "E" statique, essais de plaque à 1 palier de chargement

Août 1996, 2^{ème} campagne d'essai

Température (°C)	Recouvrement élastique (%)			Module statique "E"		
	Cycle de chargement			2ème cycle de chargement	5ème cycle de chargement	moyenne des cycles 2 à 5
	2	3	4			
Planche #1: Emulsion						
Essai #1	25	55.0	85.0	85.6	402	1162
Essai #2	25	47.4	82.7	76.9	332	481
Planche #2: Emulsion+ciment						
Essai #1	26	97.1	97.0	93.1	581	565
Essai #2	27	94.4	94.5	96.6	1162	714
Planche #3: Emulsion+chaux						
Essai #1	25	60.8	77.5	79.4	ip	854
Essai #2	26	80.3	62.7	85.6	406	863
Planche #7: Hi-tech						
Essai #1	22	80.1	78.5	100.0	ip	ip
Module "E" global (pierre 0-40mm + produit testé) MPa						282
Essai #2	26	52.8	52.2	67.6	ip	ip
Module "E" global (pierre 0-40mm + produit testé) MPa						258

ip: inférieur à la pierre

Tableau A4.4 Modules d'élasticité "E" statique, essais de plaque à 1 palier de chargement

Août 1996, 2^{ème} campagne d'essai (suite)

Température (°C)	Recouvrement élastique (%)			Module statique "E"			
	Cycle de chargement			2ème cycle de chargement	5ème cycle de chargement	moyenne des cycles 2 à 5	
	2	3	4				
Planche #4: Mousse+ciment							
Essai #1	25	89.5	78.4	82.9	1610	1345	1112
Essai #2	25	85.6	100.0	100.0	1013	1162	1237
Planche #5: Mousse							
Essai #1	27	63.2	77.8	71.6	ip	ip	ip
		Module "E" global (pierre 0-40mm + produit testé) MPa					209
Essai #2	26	52.6	64.8	71.4	ip	ip	ip
		Module "E" global (pierre 0-40mm + produit testé) MPa					197
Essai #3	26	69.8	70.2	93.6	ip	ip	ip
		Module "E" global (pierre 0-40mm + produit testé) MPa					226
Planche #6: Mousse+chaux							
Essai #1	25	47.6	60.9	65.1	ip	ip	ip
		Module "E" global (pierre 0-40mm + produit testé) MPa					162
Essai #2		Éliminé: Le produit à cet endroit ne permettait pas d'appliquer une charge de 714 kPa (la plaque s'enfonçait au point de poinçonner la surface)					
Essai #3	26	52.8	56.2	56.3	ip	ip	ip
		Module "E" global (pierre 0-40mm + produit testé) MPa					226

ip: inférieur à la pierre

Tableau A4.5 Valeurs de k et E, 3^{ème} campagne d'essais
Planches reconstruites en Août 96 et testées en Septembre 1996

	T°C	Contrainte appliquée (kPa)	Rebondissement élastique (%)				Module de réaction du sol "k" (MPa/m)	Module élastique statique "E"	
			cycle de chargement					2ème cycle de chargement	moyenne des cycles 2 à 5
			2	3	4	5			
Planche #4: Mousse+chaux									
Essai #1									
		453	80.2	75.7	82.8	100	781	413	483
	18	714	91.5	84.9	86.3	87.8	638	ip	332
		975	84.5	84.3	82		598	372	391
Moyenne des trois niveaux de contrainte							672	393	402
Essai #2									
		453	73.2	90.7	81.8	87	638	ip	ip (307)
	14	714	75.6	92.8	85	91.5	580	ip	332
		975	85.2	80.3	89.5		633	ip	332
Moyenne des trois niveaux de contrainte							617	ip	332
Essai #3									
		453	85.8	90.6	100	98.4	697	455	485
	19	714	82.5	100	91.4	86	643	355	381
		975	91.7	88.1	95.3		637	332	332
Moyenne des trois niveaux de contrainte							659	381	399
Planche #5: Mousse+ciment									
Essai #1									
		453	85.7	96.3	96.3	100	3020	3320	2846
	10	714	90.9	82.7	89.8	100	2303	1563	1660
		975	91.3	80.5	88.3		1573	962	962
Moyenne des trois niveaux de contrainte							2299	1948	1823
Essai #2									
		453	86.3	72.6	85.7	87.5	2831	2846	2805
	17	714	89.8	100	96.8	100	1785	901	858
		975	91	85.6	100		1500	1304	1043
Moyenne des trois niveaux de contrainte							2039	1684	1569
Essai #3									
		453	90	100	87.5	100	3485	2766	2656
	14	714	75.9	93.6	77.7	86	2975	1660	2656
		975	90	72.2	84.3		1912	4031	3320
Moyenne des trois niveaux de contrainte							2791	2819	2877

ip: inférieur à la pierre

(): valeur entre parenthèse= Module E global (pierre+matériau testé) de la planche

Tableau A4.5 Valeurs de k et E, 3^{ème} campagne d'essais (suite)

Planches reconstruites en Août 96 et testées en Septembre 1996

	T°C	Contrainte appliquée (kPa)	Rebondissement élastique (%)				Module de réaction du sol "k" (MPa/m)	Module élastique statique "E"	
			cycle de chargement					2ème cycle de chargement	moyenne des cycles 2 à 5
			2	3	4	5			
Planche #6: Mousse									
Essai #1									
		365	87.6	95.3	88.8	80.3	401	481	448
	14	714	63.5	97.8	96.8	93.4	408	ip	340
		975	73.3	82.4	97.5		415	ip	332
Moyenne des trois niveaux de contrainte							408	481	373
Essai #2									
		365	67.3		63.3	94.5	480	395	395
	16	714	80.7	57.9	83.3		458	ip	352
		975	79.3	90	90.8		471	ip	ip(286)
Moyenne des trois niveaux de contrainte							470	395	374
Essai #3									
		453	89.2	74.9	83.5	100	719	332	ip(281)
	22	714	81.2	100	80.4	91.3	621	ip	ip(286)
		975	84.7	96.5	90.9		613	ip	ip(306)
Moyenne des trois niveaux de contrainte							651	332	ip

ip: inférieur à la pierre

(): valeur entre parenthèse= Module E global (pierre+matériau testé) de la planche

Tableau A4.6 Résultats au FWD, boulevard Lemire à Drummondville
Stabilisation au CSS-1, Direction Sud et Nord
Relevés 1995 et 1996

	Direction	Module (MPa) 1995		Module (MPa) 1996	
		Stabilisé	Infrastructure	Stabilisé	Infrastructure
CSS-1					
	Nord	941	116	1837	190
	Nord	751	126	753	128
	Nord	484	169	799	176
	Nord	460	156	926	275
	Nord	956	172	688	288
	Nord	759	165	749	239
	Nord	954	177	742	233
	Nord	1088	178	1008	224
	Nord	2448	101	1071	151
	Moyenne	799	151	842	212
CSS-1					
	Sud	961	120	1454	125
	Sud	811	111	1067	148
	Sud	927	130	1544	132
	Sud	2234	167	2112	148
	Sud	1024	144	1013	143
	Sud	948	136	1195	137
	Sud	697	116	1693	126
	Sud	1041	115	2462	123
	Moyenne	916	130	1328	135

Résultat non retenu pour le calcul de la moyenne

**Tableau A4.7 Résultats au FWD 1995 et 1996, Boulevard Lemire
Stabilisation au Stabicol, Direction Nord**

	Direction	Module (MPa) 1995		Module (MPa) 1996	
		Stabilisé	Infrastructure	Stabilisé	Infrastructure
Stabicol	Nord	2581	123	1400	160
	Nord	1722	145	2097	159
	Nord	2464	150	2941	183
	Nord	1678	135	3119	191
	Nord	2419	144	7192	198
	Nord	2537	120	2659	172
	Nord	1349	168	2857	173
	Nord	1578	140	2158	216
	Nord	2225	168	3845	223
	Nord	1360	120	1253	192
	Nord	2189	137	2217	153
	Nord	2429	147	4938	162
	Nord	2088	164	3846	183
	Nord	1080	118	1907	153
	Nord	1419	126	1997	145
	Nord	704	165	2473	175
	Nord	995	81	1028	125
	Nord	911	127	800	171
	Nord	1081	168	1227	152
	Nord	1262	142	2150	171
	Nord	584	183	4762	172
	Nord	1931	129	2733	128
	Nord	1717	156	2589	171
	Nord	2623	140	3255	168
	Nord	2435	101	2763	159
	Nord	2131	119	1264	155
	Nord	1664	131	2931	159
	Nord	1093	120	1760	144
	Nord	1973	133	1972	145
	Nord	949	173	1402	202
	Nord	1223	119	2746	144
	Nord	2673	135	1230	147
	Nord	2039	135	1649	144
	Nord	1711	134	2139	155
	Nord	2110	124	803	133
	Moyenne	1741	138	2163	165

Résultat non retenu pour le calcul de la moyenne

**Tableau A4.8 Résultats au FWD 1995 et 1996, Boulevard Lemire
Stabilisation au Stabicol, Direction Sud**

	Direction	Module (MPa) 1995		Module (MPa) 1996	
		Stabilisé	Infrastructure	Stabilisé	Infrastructure
Stabicol					
	Sud	2180	162	3742	173
	Sud	1769	140	2570	148
	Sud	3168	144	5616	165
	Sud	427	120	998	166
	Sud	899	93	868	107
	Sud	2492	105	3052	122
	Sud	2057	125	1679	137
	Sud	2717	141	2077	157
	Sud	3079	120	1901	129
	Sud	2545	112	2747	136
	Sud	2681	136	2132	155
	Sud	1458	93	800	144
	Sud	3791	152	1540	140
	Sud	4081	185	3158	144
	Sud	3601	172	3500	127
	Sud	336	136	2323	125
	Sud	1499	99	1170	139
	Sud	1030	107	1824	126
	Sud	701	110	811	115
	Sud	3004	118	2542	118
	Sud	2051	106	1663	100
	Sud	1876	112	3046	108
	Sud	606	101	752	109
	Sud	2222	113	5181	111
	Sud	3178	100	4345	101
	Sud	1328	154	4956	167
	Sud	836	110	1127	130
	Sud	1687	125	1917	125
	Sud	1375	105	4078	121
	Sud	2098	122	1410	103
	Sud	1586	99	632	117
	Sud	1138	95	753	90
	Sud	742	106	1130	141
	Sud	2256	134	1314	128
	Moyenne	1871	122	2087	130

Résultat non retenu pour le calcul de la moyenne

Annexe 5

Annexes se rapportant au chapitre 9

**Tableau A5.1 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration
Boulevard Lemire à Drummondville, été 1995**

Stabicol Drummondville												
Heures de cur	1	5	6	21	24	26	29	44	67	72	90	101
Résultats pour 6,35 cm de pénétration												
	23	43	47	52	59	120	35	120	170	32	86	30
	28	31	49	51	68	85	48	89	144	85	84	76
	20	29	42	50	54	75	90	44	145	131	80	127
					55			55		88		90
					25			39		153		
					27			32		90		
CSS-1 Drummondville												
Heures de cur	8	28	79									
Résultats pour 6,35 cm de pénétration												
	30	56	66									
	27	40	73									
	31	24	84									
	32	44	51									
	24	35	45									
	24	30	61									

**Tableau A5.2 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration
Planches d'essais, CTED Montréal automne 1995 et 1996**

Planche #1 Émulsion									
Heures de cure	5	22	52	74	174	287	580	1103	8112
	29	39	63	107	260	235	275	530	4233
	34	46	89	77	210	410	469		1588
	23	55	73	55					
Planches #2 Émulsion+ciment									
Heures de cure	5	22	52	74	174	287	1103		
	34	73	125	115	208	550	+1000		
	45	128	96	207	495	378			
	65	137	158	275					
Planche #3 Émulsion+chaux									
Heures de cure	5	22	52	74	174	287	1103	8112	
	37	49	84	100	244	237	298	349	
	41	66	108	147	270	260	303	317	
	36	64	90	82				251	
Planches #4 1995 Mousse+ciment									
Heures de cure	1	52	113	233					
	36	200	439	227					
	33	328	299	490					
	32								
Planche #5 1995 Mousse									
Heures de cure	32	93	164	171	406	909	7824		
	40	46	100	60	97	161	75		
	45	55	94	74	96	96			
Planche #6 1995 Mousse+chaux									
Heures de cure	32	93	164	171	406	909	7824		
	68	71	56	80	89	90	80		
	59	51	82	48	90	88			

Tableau A5.2 Résultats à l'essai au pénétromètre pour 6,35 cm de pénétration
Planches d'essais, CTED Montréal automne 1996 (suite)

Planche #4 1996 Mousse+chaux									
Heures de cure	6	24	48	147	520				
	37	80	220	120	222				
	52	80	75	111					
		83	156						
Planche #5 1996 Mousse+ciment									
Heures de cure	4	22	46	145	528				
	45	191	125	300	850				
	63	176	210	385					
		186	200						
Planche #6 1996 Mousse									
Heures de cure	2	18	42	143	526				
	45	69	78	96	254				
	37	78	68	92					
		101	73						

Bibliographie

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS
(1993) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Washington D.C., U.S.A.,
volume 1.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS
(1986) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Washington D.C., U.S.A.,
volume 2.
- AMIRI, A., LEFRANÇOIS, P. (1994) *Stabilisation en place à l'émulsion après
décohésionnement*, Communication présentée au Congrès 1994 de l'IRE, Calgary,
Ministère des Transports du Québec, p. B51-B75.
- ASPHALT INSTITUTE (1969) *Soils Manual for Design of Asphalt Pavement Structures*,
Manual series No 10, U.S.A, 2^{ème} édition, 3^{ème} impression, Asphalt Institute, 269 p.
- ASPHALT INSTITUTE (1983) *Asphalt Cold-Mix Recycling*, Manual series No. 21, U.S.A., 1^{ère}
édition, Asphalt Institute, 68 p.
- BEAUDOIN, M., LANGLOIS, P. (juin 1994) *Retraitement en place avec le liant bitume/ciment
Stabicol*, Programme d'essai liant Stabicol 90, Sainte-Foy, Ministère des Transports du
Québec, N/D: 6.2.4-93.6-441, 27 p.
- BEGIN, L. (novembre 1987) *Correlation Study Among Falling Weight Deflectometer,
Benkelman Beam and Dynaflect*, Final Report, Alberta, Alberta Transportation and
Utilities, Report No. ABTR/RD/RR-87/11, 13 p.
- BERGERON, G., MARTINEAU, B. (avril 1995) *Réutilisation des résidus de béton bitumineux,
Étude du comportement mécanique et hydraulique des matériaux granulaires contenant
des granulats bitumineux (g.b.)*, AQTR congrès du 30^{ème} anniversaire, Hull, Tome 1,
p. 173-194.
- BEYER, W. H. (1987) *CRC Standard Mathematical Tables*, Floride, 28^{ème} édition, CRC
press Inc., 674 p.
- BONIN, J. (automne 1993) *Étude de l'influence d'un ajout de ciment Portland, type 10, dans la
méthode de retraitement des chaussées: pulvérisation-stabilisation*, Projet de spécialité
GCI-950, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 50 p.
- BONIN, J., BROWN, D.-L., HOULE, D. (juin 1996a) *Étude du potentiel de caractérisation des
matériaux recyclés stabilisés avec l'essai au "Pénétrömètre dynamique"*, Rapport d'étude,
Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 37 p.

- BONIN, J., CHARTIER, C. (avril 1996b) *La réhabilitation routière et le recyclage des bétons, les mots font la paire, Rapport d'étude*, Montréal, École de Technologie Supérieure dans le cadre du cours MGC-840, 94 p.
- BRENNAN, M.J., HUET, M., LAFFONT, J.F., PAUTE, J.L. (1990) *Toward Understanding the Behavior of Grave Emulsions by Means of Laboratory Study*, Asphalt Institute, ASTM STP 1079, H.W. Muncy edition, Philadelphia, p. 20-35.
- CONSTRUCTION SOTER (novembre 1995) *Stabilisation à la mousse de bitume de matériaux granulaire contaminés par de l'argile, Rapport d'étude*, Delson, Soter, 6 p.
- CONTANT, A. (novembre 1996) *Révision des calculs structuraux. Planches d'essais CTED*, Dossier CR-1045, Montréal, CRCAC, 3 p.
- CONTANT, A. (octobre 1995) *Relevés Dynaflect et Benkelman. Planches d'essais, CTED*, Dossier CR-106, Montréal, CRCAC, 6 p.
- CONTANT, A. (octobre 1996) *Deuxième série de relevés Dynaflect et Benkelman. Planches d'essais, CTED*, Dossier CR-1045, Montréal, CRCAC, 6 p.
- CORTÉ, J.-F., GOUX, M.-T. (1994) *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*, France, LCPC et SETRA.
- DEACON, J.A., MONISMITH, C.L. (1967) *Laboratory Flexural-Fatigue Testing of Asphalt Concrete with Emphasis on Compound-Loading Tests*, Highway Research Board, Record No. 158.
- DELORME, J.-L. (novembre-décembre 1990) *Détermination du module in situ des enrobés par l'essai de traction uniaxiale réalisé sur la machine asservie d'essais rhéologiques*, Bulletin de liaisons du LCPC, No. 170, p.29-32.
- DORCHIES, P.T., BERGERON, G., THÉBEAU, D. (1995) *Retraitement en place et stabilisation des chaussées par l'utilisation du liant STABICOL. Bilan du suivi des performances 1994-1995*, Ministère des Transports du Québec.17 p.
- DOUGLAS, R. A., ELLER, G. L. (1986) *Nondestructive Pavement Testing by Wave Propagation: Advanced Methods of Analysis and Parameter Management*, Transportation Research Record 1070, p. 53-62.
- EAGLESON, B., HEISEY, S., HUDSON, W. R., MEYER, A., STOKOE, K.H. (novembre 1982) *Comparaison of the Falling Weight Deflectometer and the Dynaflect for Pavement evaluation*, Center for Transportation Research, Texas, University of Texas at Austin, Research Report 256-1, 11 p.
- EMERY, J. J. (1993) *Asphalt Concrete Recycling in Canada*, Transportation Research Record 1427, p. 38-46.

- EPPS, J. A., ALLEN, D. D., BEATTY, T. L., CARROL, J.J., GUNDERMAN, W.G., JAYAPARAKASH, G. P., KANDHAL, P. S., PRADERE, P.F., STUART, K. (juillet 1990) *Cold-Recycled Bituminous Concrete Using Bituminous Materials*, National Cooperative Highway Research Program, No. 160, 53 p.
- FAVRETTI, P. (été 1994) *Résistance aux cycles de gel/dégel de divers mélanges bitumineux à froid*, Routes et Transports, volume 24, No. 2, p.46-56.
- GOACOLOU, H., SOLIMAN, S., LE BOURLOT, F., BOSSÉ, J. (juillet-août 1996) *La grave-mousse un matériau économique pour couches d'assise*, Revue générale des routes et des aérodrômes, No. 742, p. 55-61.
- GODARD, E. (décembre 1991) *Stabicol un matériau composite pour les routes de demain*, Revue générale des routes et aérodrômes, No. 691, p. 117-121.
- GODARD, E. (octobre 1991) *Stabicol le liant de la réconciliation*, Revue générale des routes et aérodrômes, No. 689, p. 73-78.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. (1981) *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Englewoods Cliffs (New Jersey), Prentice Hall, 733 p.
- HOTTE, P. (novembre 1995) *Recyclage à froid*, Texte des conférences AQTR: Le recyclage des bétons en centrale d'enrobage, Longueuil, AQTR, 10^{ème} présentation.
- HUANG, Y. H. (1993) *Pavement Analysis and Design*, Englewoods Cliffs (New Jersey), Prentice Hall, 805 p.
- KALLAS F., B. (novembre 1979) *Elastic and Fatigue Behavior of Emulsified Asphalt Paving Mixes*, Lexington, U.S.A., Asphalt Institute, 57 p.
- KARRAY, M., LEFEBVRE, G. (mai 1996) *Évaluation des propriétés élastiques des planches d'essai (Montréal) à l'aide de la méthode SASW_p*, Rapport GEO-96-02 présenté au Laboratoire de la ville de Montréal, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 21 p.
- KULKARNI, R. B., ALVITI, E., CONNOR, B. (1986) *Use of Falling Weight Deflectometer Data in Predicting Fatigue Cracking*, Transportation Research Record 1070, p. 69-76.
- LAFLEURS, J., GINGRAS, R. (avril 1974) *La société de développement de la Baie James, étude structurale de la chaussée, route d'accès à la Baie James*, Rapport final, Laval, Desjardins +Sauriol et associés, 38 p.
- LAFON, J.-F. (janvier-février 1993) *Retraitement à froid des chaussées à l'émulsion de bitume; Méthodologie d'étude; Suivi de réalisation et de comportement*, Bulletin de liaison du LCPC, No. 183, p. 23-34.

- LAUZON, M., D'AMOURS, L. (décembre 1995) *Projet de recherche sur les matériaux de chaussée stabilisés, centre de traitement et d'enfouissement des déchets Montréal, Mesures de la capacité structurale, Dossier L95-9209*, Longueuil, Fondatec Inc., 3 p.
- LAUZON, M., D'AMOURS, L. (novembre 1996) *Projet de recherche sur la stabilisation des chaussées boulevard Lemire Drummondville, Québec, Mesures de la capacité structurale, Dossier L95-9213*, Longueuil, Fondatec Inc., 4 p.
- LAUZON, M., D'AMOURS, L. (octobre 1995) *Projet de recherche sur la stabilisation des chaussées boulevard Lemire Drummondville, Québec, Mesures de la capacité structurale, Dossier L95-9213*, Longueuil, Fondatec Inc., 3 p.
- LAVOIE, S., D'AMOURS, L. (novembre 1996) *Projet de recherche sur les matériaux de chaussée stabilisés, centre de traitement et d'enfouissement des déchets Montréal, Mesures de la capacité structurale, Dossier L96-9224*, Longueuil, Fondatec Inc., 3 p.
- LEE, K.W., HU, C.-P., MARCUS, A.S., MAO, H. (1994) *Estimation of Layer Coefficients for Flexible Pavement Design and Development of a Practical and Rational Mix-Design, Paper prepared for presentation at the 1994 International Road Federation Conference, University of Rhode Island, p. f35-f91.*
- LOISEL, A. (décembre 1994) *Étude et développement des méthodes de formulation en laboratoire des matériaux recyclés décohésionnés-stabilisés, Mémoire de maîtrise en science appliquées, spécialité génie civil*, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 235 p.
- LOISEL, A., LUPIEN, C., MARTINEAU, B. (avril 1995) *Développement d'une méthode de formulation pour les mélanges décohésionnés et stabilisés à l'émulsion, AQTR congrès du 30^{ème} anniversaire*, Hull, Tome 2, p. 239-258.
- LUPIEN, C. (1986) *Caractérisation des propriétés des agrégats fabriqués à l'aide de béton bitumineux concassé et évaluation de quelques utilisations, Rapport de recherche présenté au MTQ*, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 69 p.
- LUPIEN, C., BONIN, J. (décembre 1995) *Évaluation des performances des chaussées réhabilitées avec des matériaux recyclés et enrobés en centrale, Rapport d'analyse produit pour le Laboratoire de la ville de Montréal*, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 7 p.
- LUPIEN, C., BONIN, J. (décembre 1995) *Résultats d'essais de plaque sur matériaux recyclés stabilisés, Rapport d'étape présenté au Laboratoire de la ville de Montréal*, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 16 p.
- LUPIEN, C., BONIN, J. (octobre 1996) *Résultats d'essais de plaque sur matériaux recyclés stabilisés, Projet des planches d'essais, CTED, Rapport final présenté au Laboratoire de la ville de Montréal*, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 22 p.

- MARTINEAU, M. (septembre 1994) *Ville de Drummondville, boulevard Lemire, voirie et égout pluvial*, Devis projet No 0594025, Drummondville, Groupe HBA experts-conseils, 56 p.
- MASCOLO, F. (1995) *Amélioration et renforcement de la structure par l'utilisation de Stabicol-90, Ville de Drummondville*, Rapport, Sherbrooke, Les Laboratoires Shermont Inc., 260 p.
- MICHAUT, J.-P., COSTE, J.-F. (septembre 1992) *Les produits Colas au manège*, Revue générale des routes et des aéroports, No. 699, p. 55-69.
- MONTGOMERY, D.C. (1991) *Design and Analysis of Experiments*, U.S.A., 3^{ème} édition, John Wiley & Sons, 649 p.
- NAZARIAN, S., STOKOE, K. H. (1986) *Use of Surface Waves in Pavement Evaluation*, Transportation Research Record 1070, p. 132- 144.
- PACKARD G., R. (1984) *Calcul de l'épaisseur des chaussées de routes et rues en béton de ciment*, Montréal, Association Canadienne du Ciment Portland, 56 p.
- PAGDADIS, S. A., ISHAI, I. (1994) *Design of Real-Time Site Operations Control for In-Place Asphalt Pavement Recycling*, Transportation Research Record 1465, p. 31-38.
- PEYRONNE, C., CAROFF, G. (1991) *Dimensionnement des chaussées*, France, 2^{ème} édition, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 244 p.
- PROTEAU, M. (novembre 1995) *Mise en oeuvre des matériaux issus du recyclage*, Texte des conférences AQTR: Le recyclage des bétons en centrale d'enrobage, Longueuil, AQTR, 11^{ème} présentation.
- RADA, G.R., RABINOW, S. D., WITCZAK, M. W., RICHTER C. A.(1992a) *Strategic Highway Research Program Falling Weight Deflectometer Quality Assurance Software*, Transportation Research Board 1377.
- RADA, G. R., RICHTER, C. A., STEPHANOS, P. J. (1992b) *Layer Moduli From Deflection Measurements Software Selection and Development of Strategic Highway Research Program's Procedure for Flexible Pavements*, Transportation Research Board 1377.
- REGIS, C. (1985) *Assises de chaussée*, France, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 144 p.
- ROHDE, G.T. (janvier 1994) *Determining a Pavement's Structural Number from FWD Testing*, Transportation Research Board, 74rd Annual Meeting, Washington, Paper No. 94 0351, 15 p.
- SCHOLZ, T., HICKS, R.G., ALLEN, D. (1990) *Mix Design Practices for Cold In-Place Recycled Pavements*, Asphalt Institute, ASTM STP 1079, H.W. Muncy edition, Philadelphia, p. 44-64.

- SEBAALY, B. E., MAMLOUK, M. S., DAVIES, T. G. (1986) *Dynamic Analysis of Falling Weight Deflectometer Data*, Transportation Research Record 1070, p. 63-68.
- SOUCY, A., CONTANT, M. (avril 1996) *Étude comparative des différents logiciels d'analyse des bassins de déflexion obtenus à l'aide des déflectomètres Dynaflect et FWD*, Rapport d'étude, Montréal, École de Technologie Supérieure dans le cadre du cours MGC-840, 131 p.
- ST-LAURENT, D, ROY, M., BERGERON, G. (1995) *Variation saisonnière de la portance des chaussées souples: une étude avec le FWD*, AQTR congrès du 30^{ème} anniversaire, Hull, Tome 2, p. 52-73.
- ULLIDTZ, P., STUBSTAD, R.N. (1989), *Analytical-Empirical Pavement Evaluation Using the Falling Weight Deflectometer*, Transportation Research Record 1022, p. 36-44.
- WIK VAN, A., YODER, E.J., WOOD, L.E. (1983) *Determination of Structural Equivalency Factors of Recycled Layers By Using Field Data*, Transportation Research Record 898, p. 122-132.
- WIJK VAN, A. J. (1984) *Strutural Comparaison of Two Cold Recycled Pavement Layers*, Transportation Research Record 954, p.70-77.
- WOOD, L.E., ALTSCHAEFFL, C.M., BEAUDOIN, C., CASTEDO, L.H. (mars 1984) *The Use of Foamed Asphalt in Bituminous Stabilization of Base and Subbase Materials and Recycled Pavements Layers*, Highway Research Project, Perdue Universty, Final Report.
- YODER, E. J., WITCZAK, M. W. (1975) *Principles of Pavement Design*, U.S.A., 2^{ème} édition, John Wiley & Sons, 711 p.
- ZEISNER, G.F. (avril 1995) *Cold In-Place Asphalt Recycling in the Regional Municipality of Ottawa-Carleton*, AQTR congrès du 30^{ème} anniversaire, Hull, Tome 1, p. 159-171.